

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Т. П. Павленко,
В. М. Шавкун,
О. С. Козлова**

**СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ
КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ**

ПІДРУЧНИК

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021**

УДК 681.587.72:004(075.8)
П12

Автори:

Павленко Тетяна Павлівна, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

Шавкун Вячеслав Михайлович, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

Козлова Ольга Сергіївна, старший викладач кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рецензенти:

Сінчук Олег Миколайович, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету;

Яровенко Володимир Олексійович, професор доктор технічних наук, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання Одеського національного морського університету

*Рекомендовано до друку Вченою Радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол № 12 від 01 липня 2020 р.*

Павленко Т. П.

П12 Сучасні електромехатронні комплекси і системи : підручник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 265 с.

ISBN 978-966-695-523-7

Підручник складено для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка з метою допомоги під час підготовки до занять та екзаменів з дисциплін «Системи електропостачання в електромехатронних комплексах» та «Сучасні технології діагностики електромехатронних систем транспортних засобів».

УДК 681.587.72:004(075.8)

ISBN 978-966-695-523-7

© Т. П. Павленко, В. М. Шавкун,
О. С. Козлова, 2021
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМЕХАТРОНІКУ.....	9
1.1 Тенденції розвитку мехатронних систем та наукових напрямків.....	9
1.2 Структурні базиси та принципи будови мехатронних систем.....	12
1.3 Еволюційний розвиток модулів технічних систем	16
1.4 Позиції створення сучасних технічних систем	18
1.5 Проєктно-технологічний базис мехатронних систем	20
1.6 Комплексні технології пріоритетних напрямків мехатроніки.....	22
Контрольні запитання.....	25
2 ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ	26
2.1 Тенденції створення електромехатронних систем	26
2.2 Об'єкти та елементи електромехатроніки.....	29
2.3 Залежність роботи електроприводних систем від динамічних перехідних процесів	33
2.4 Особливості електромехатронних модулів.....	38
2.5 Рівні інтеграції електромехатронних систем.....	41
2.6 Інтелектуальні модульні системи електромехатронних комплексів.....	44
2.7 Інтелектуальні транспортні системи і технології в інфраструктурі міст.....	58
2.8 Електромехатронні системи і комплекси керування міським електротранспортом.....	62
Контрольні запитання.....	79
3 ЕЛЕМЕНТИ КЕРУВАННЯ В СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСАХ ТА СИСТЕМАХ.....	80
3.1 Мікропроцесорні системи та їхні структури.....	80

3.2	Мікроконтролерні пристрої і їхні структурні елементи.....	87
3.3	Приклад роботи інтелектуальних систем.....	91
	Контрольні запитання.....	97
4	РОБОТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ.....	98
4.1	Основа робототехнічних комплексів.....	98
4.2	Головні елементи і параметри системних модулів роботів.....	104
4.3	Кінематичні характеристики промислових роботів.....	114
4.4	Функції та положення комплексних пар механізму маніпулятора.....	117
4.5	Динамічні параметри маніпулятора під час навантаження та основні елементи.....	124
4.6	Динаміка кінематичних ланок та механізмів.....	129
4.7	Системи керування робототехнічними пристроями.....	139
4.8	Роботизовані електромехатронні системи та модулі.....	145
4.9	Робототехнічні комплекси та їхнє програмне забезпечення.....	149
	Контрольні запитання.....	163
5	ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ.....	164
5.1	Технічна діагностика та методи діагностування.....	164
5.2	Засоби діагностування електромехатронних модулів і систем.....	180
5.3	Структура діагностичних систем.....	182
5.4	Засоби діагностики електромехатронних систем.....	188
5.5	Сучасне обладнання діагностики електромехатронних пристроїв.....	194
5.6	Автоматизовані діагностичні системи.....	195
	Контрольні запитання.....	202
6	ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ.....	203
6.1	Головні поняття та терміни теорії надійності.....	203

6.2	Методи прогнозування надійності.....	205
6.3	Етапи та задачі надійності.....	206
6.4	Прогнозування технічного стану електромехатронних систем.....	208
	Контрольні запитання.....	220
7	МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ.....	221
7.1	Базові положення теорії моделювання.....	221
7.2	Елементи динаміки електромехатронних пристроїв.....	224
7.3	Динамічні характеристики нелінійних елементів.....	234
7.4	Автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи.....	241
7.5	Порівняльний аналіз методів динаміки.....	242
7.6	Метод зв'язкових графів.....	245
7.7	Моделювання та автоматизація динаміки систем із використанням методу зв'язкових графів.....	248
	Контрольні запитання.....	255
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	256
	ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	259

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД	– асинхронний електродвигун
АЛП	– арифметико-логічний пристрій
АЛС	– автоматична локомотивна сигналізація
АРС	– автоматична регулювальна система
АСК	– автоматизована система керування
АРШ	– автоматичне регулювання швидкості
АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач
БСМ	– блок сигналізації машиніста
БМК	– бібліотека моделей компонентів
ВДЖ	– вторинне джерело живлення
ВМЛ	– вихідна механічна ланка
ГЕР	– гармоніка від ексцентриситету ротора
ДП	– діагностичний пристрій
ДПР	– датчик положення ротора
ДШ	– датчик швидкості
ЕМ	– елементарний модуль
ЕМЕП	– електромехатронна енергетична підсистема
ЕМК	– електромехатронний комплекс
ЕММР	– електромехатронний модуль руху
ЕМП	– електромеханічний перетворювач
ЕМПр	– електромехатронний пристрій
ЕМС	– електромехатронна система
ЕРС	– електрорушійна сила
ЕРПр	– електрорухомий пристрій
ЕС	– експертна система
ІЕММ	– інтелектуальний електромехатронний модуль
ІЕМР	– інтелектуальний електромехатронний модуль руху
ІЕМ	– інтелектуальна електромехатронна машина
ІТС	– інтелектуальна транспортна система
ККД	– коефіцієнт корисної дії
КП	– контрольовані пункти
КПМ	– кінематична пара маніпулятора
МЕТ	– міський електротранспорт
МК	– мікроконтролер
МКМ	– магнітокомутаційні машини
МНП	– маніпулятор
МП	– мікропроцесор
НСК	– нерухома система координат
ОК	– об'єкт керування
ПА	– потягова апаратура
ПК	– перетворювач координат

ПЛІС	– програмована логічна інтегральна схема
ПР	– промисловий робот
РП	– робототехнічний пристрій
РТК	– роботизований технологічний комплекс
РЧХ	– речова частотна характеристика
СА	– система автоматизації
САВПМ	– система автоведення потягів метрополітену
САПР	– система автоматизованого проєктування
СДФ	– система функціонального діагностування
СКД	– система керування та діагностики
СКК	– система координат компонента
СНП	– силовий напівпровідниковий перетворювач
СП	– сенсорні пристрої
СУ РП	– система управління робототехнічного пристрою
СЦОС	– стаціонарна цифрова обчислювальна система
ТЕД	– тяговий електродвигун
ТЗ	– транспортний засіб
ТЗД	– технічний засіб діагностики
ТП	– тягова підстанція
УОК	– управляючий обчислювальний комплекс
ШІМ	– широтно-імпульсний модулятор
ЦАП	– цифроаналоговий перетворювач
ЦДП	– центральний диспетчерський пункт
ЦДУ	– центральне диспетчерське управління
ЦПУ	– центральний пост управління

ВСТУП

Розвиток науки і техніки на сучасному рівні сприяє створенню нових технологій, розробці інтелектуальних систем та впровадженню комплексів нового покоління.

Однією з основних тенденцій розвитку сучасної промисловості є впровадження в технологічний процес електромехатронних модулів і систем.

З урахуванням виробничої і побутової техносфери створюються інтелектуальні елементи автоматизації та роботизації, які володіють принципово якісними новими функціями незалежно від втручання в їхню роботу операторів. Водночас електромехатронний підхід полягає в перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних компонентів, які перепрограмуються в нову задачу і подальшу дію.

Узгодження принципів проектування фізично різнорідних компонент механічної та електричної системи складає головну концепцію електромехатронних комплексів.

Завдяки принципам і концепціям складаються програмовані модулі автоматизованого формування, створюються математичні моделі динаміки технологічних машин і їх окремих функціональних частин. У результаті відкриваються нові методи досліджень параметрів, характеристик та впровадження в подальше виробництво інтелектуальних модульних систем, блоків, підсистем і комплексів.

Паралельно на базі створення електромехатронних систем та підсистем розвиваються перспективні методи їхнього діагностування, що сприяє визначенню дефектів та створенню сучасних автоматизованих конструкцій, які мають широкі можливості та взаємозаміну елементів.

На цей час в багатьох галузях промисловості електромехатронні системи заміняють традиційні механічні машини, які вже не відповідають сучасним якісним вимогам. Особливістю електромехатронного підходу є не розширення, а заміщення функцій, які традиційно виконуються механічними елементами системи, на електронні та комп'ютерні блоки.

Таким чином, електромехатроніка – це комплекс ідей, методів і засобів для створення комп'ютерно-програмованих і програмованих електромеханічних систем із заданими функціями і взаємодією з навколишнім середовищем.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМЕХАТРОНІКУ

1.1 Тенденції розвитку мехатронних систем та наукових напрямків

Стрімкий розвиток мехатроніки як нового науково-технічного напрямку обумовлений швидко зростаючим інтересом і високою активністю фахівців у науково-дослідній, освітній і виробничій сферах. Це визначає перспективу розвитку електромехатроніки в ХХІ столітті як одного з ключових напрямів сучасної науки та техніки.

Історія розвитку електромехатроніки як науки почалась з розвитку окремих наук, на стиках яких виникають нові ідеї (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Етапи розвитку електромехатроніки

Наприклад, наука, що виникла в стародавні часи на початку розвитку нашої цивілізації, є «механіка». Перший трактат із механіки, що дійшов до наших часів, з'явився в Стародавній Греції у вигляді твору Аристотеля (384–322 рр. до н. е.). Далі наукові основи статички у механіці розробив Архімед (287–212 рр. до н. е.). Із покоління в покоління на протязі багатьох століть розвивалась ця наука. Безцінний подальший внесок у розвиток механіки зробили Г. Галілей, І. Ньютон, Д. Максвелл, Ж. Лагранж, Х. Лоренц, Л. Ейлер, М. В. Остроградський, М. Є. Жуковський, Г. Р. Герц, І. В. Мещерський, К. Е. Цюлковський та багато інших.

З розвитком людства та вдосконалення існуючих механізмів завдяки розвитку електромеханіки та відкриттю нових законів з'явилися нові електромеханічні системи.

Перше практичне застосування електродвигуна постійного струму розпочато в 1834 р. Автором винаходу є академік з електромеханіки Б. С. Якобі.

Наприкінці XIX ст., завдяки відкриттю в 1886 року Г. Феррарісом і Н. Теслою явища обертаючого магнітного поля, почалось створення багатофазних електродвигунів змінного струму. У 1888 р. Доливо-Добровольський запропонував і реалізував трифазну систему передачі електричної енергії змінного струму та розробив у 1889 р трифазний асинхронний двигун та трансформатор.

Таким чином, поєднання функцій механічних та електромеханічних систем (рис. 1.2) спричинило створення нових ідей і принципів, що дало розвиток нової науки електромеханіки. Вона поєднала знання про електротехніку і механіку, їхні основні положення та закони, які було визначено та доведено роботою різних вузлів та агрегатів.

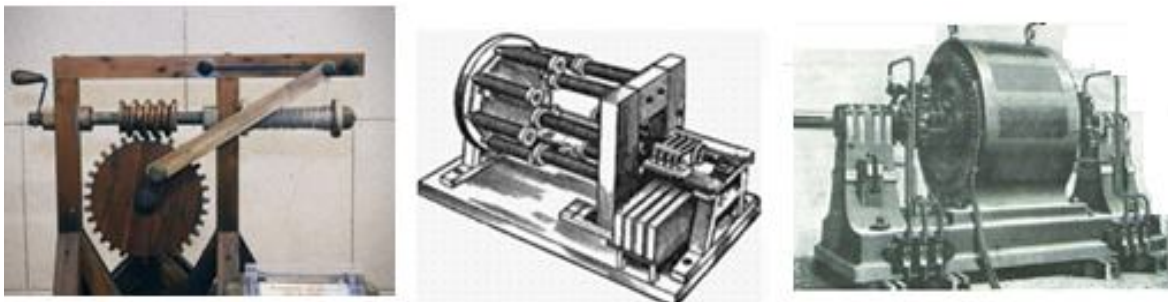


Рисунок 1.2 – Стародавні механічні та електромеханічні системи

Першим поштовхом еволюції електронних компонентів було створення транзистора (1957 р.). Така ідея сприяла заміні механічних елементів систем автоматичного керування на електронні елементи.

Електроніка не потребувала наявності механічних частин, що посприяло зникненню проблем із механічним зносом компонентів. Поява електронних компонентів стала початком активного розвитку комп'ютерних технологій і програмного забезпечення.

Починаючи з кінця 1960-х років компанія Yaskawa застосовувала електронні елементи керування для систем електроприводів. Саме в ті роки з'явився термін «мехатроніка», який складався з комбінації слів «МЕХАніка» і «елекТРОНІКА». Незабаром цей термін став сприйматися як комбінація електронної і точної механіки в зв'язці з програмним забезпеченням. У результаті визначились мета, предмет та методи мехатроніки, що сприяло

створенню основних принципів та широкому застосуванню мехатронних систем.

Мета мехатроніки складається зі створення інтелектуальних машин і технічних систем різного призначення з огляду на фізичні процеси, що відбуваються, та спричиняють створення якісно нових функцій, властивостей і характеристик.

Предметом мехатроніки є методи, процеси проєктування та виробництва якісно нових модулів, комплексів і машин, а на їхній основі – інтелектуальних дослідних і промислових самоврядних технічних систем.

Метод мехатроніки заснований на системному поєднанні відокремлених природничо-наукових і інженерних напрямків. До основних напрямків належать: точна механіка, електротехніка, мікроелектроніка, комп'ютерне керування та інформатика. Розповсюдження напрямків діє на всіх етапах життєвого циклу виробів, починаючи з маркетингу та проєктування, і продовжуючись на етапах реалізації (виробництва), експлуатації та утилізації.

Особливістю мехатроніки як галузі науки є синергетичне об'єднання вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними й комп'ютерними компонентами. Завдяки існуючим методам мехатроніки створюються сучасні модулі та системи.

Модуль – це уніфікована функціональна частина машини (системи), конструктивно оформлена як самостійний виріб або підсистема.

Мехатронний модуль – це функціональний і конструктивно самостійний синергетичний, апаратно та програмно інтегрований виріб (або підсистема), що складається з елементів різного фізичного походження і призначений для реалізації певних функцій системи.

Такий склад забезпечує проєктування та виробництво якісно нових механізмів, машин і систем з інтелектуальним керуванням і функціональними рухами [1, 2, 3].

Термін «синергетика» (інтеграція) був запропонований у 70-х роках ХХ століття німецьким фізиком Г. Хакеном і позначав спільну дію та співробітництво, що спрямовані на досягнення спільної мети. Загалом, синергетичне об'єднання передбачає не просте з'єднання окремих частин систем, а інтелектуальних досягнень шляхом об'єднання більш високих результатів.

Таким чином, в основі побудови мехатронних систем є принципи *синергетики*, які поєднують в одному агрегаті компоненти різної технічної природи, а також адаптивно взаємодіють із зовнішнім середовищем як єдиний функціональний і конструктивний організм. Це визначає

синергетичну інтеграцію (об'єднання), яка є основою сучасних методів мехатроніки, структурних елементів та модулів, технологій, енергетичних та інформаційних потоків для досягнення єдиної мети.

1.2 Структурні бази та принципи будови мехатронних систем

Визначення мехатронних об'єктів та їхній зв'язок представляються авторами у вигляді деяких геометричних фігур, таблиць, алгоритмів. Розглянемо особливості мехатронних об'єктів на принципах моделей, що показані у вигляді структурних пірамід мехатроніки, які враховують і складаються з трьох частин: механічної, електронної та інформаційної. Така конструкція створює цілісність не тільки мехатронного об'єкта, а також і технологічних процесів [рис. 1.3, 1–5].

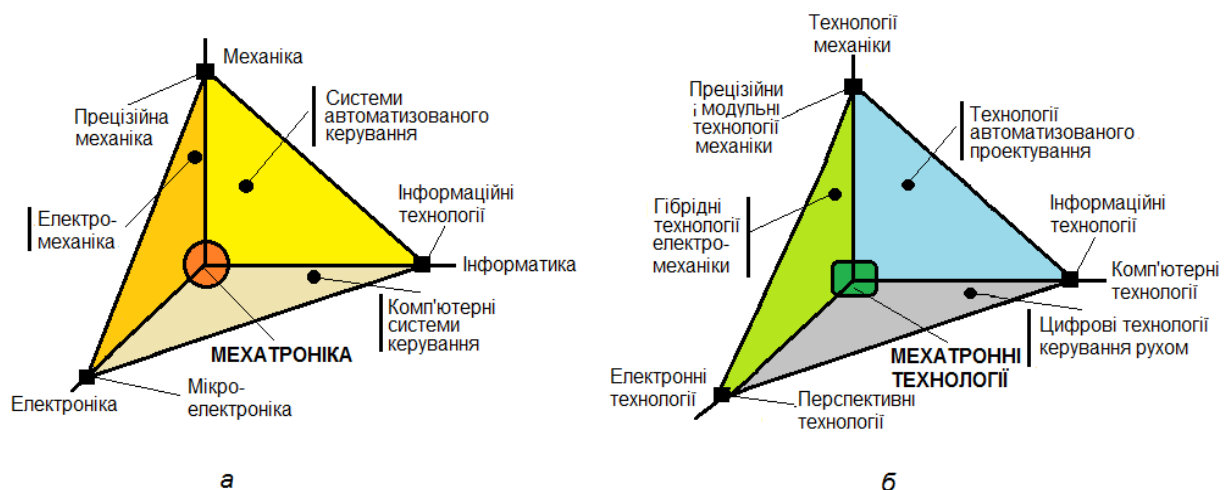


Рисунок 1.3 – Структурна (а) і технологічна (б) піраміди мехатроніки [1–5]

На рисунку 1.3, а осі координат піраміди відповідають базовим напрямам механіки, електроніки, інформатики. На координатних осях відзначені сучасні рівні розвитку частин напрямів: прецизійна механіка, мікроелектроніка, інформаційні технології.

Попарно інтеграція базових напрямів (грані піраміди) утворює три гібридних напрями, до яких належать: електромеханіка, комп'ютерні системи керування, системи автоматизованого проектування механічних систем. Гібридні напрямки об'єднує мехатроніка.

Базові та гібридні напрями визначають технологічний базис мехатроніки (рис. 1.3, б).

Пірамідальна форма та склад технологічної піраміди мехатроніки повністю відповідає її структурному базису. Фундаментом технологічного базису мехатроніки є нові технології всіх базових напрямів: прецизійні та модульні технології механіки, мікроелектронні та інформаційні технології.

Усі компоненти мехатронних модулів поділяються на групи, що визначаються елементами:

- виконавчі, до яких належать механічні та електротехнічні елементи (двигуни, перетворювачі руху, напрямні, гальма тощо);
- інтелектуальні, до яких належать силові електронні блоки, інформаційні та керувальні.

Загальні тенденції розвитку техніки й особливостей електромехатроніки, а також робототехніки безпосередньо визначають головні принципи, які мають системний підхід відповідно щодо закону ступеня $3/2$, а також поетапну мініатюризацію, уніфікацію, інтеграцію, інтелектуалізацію [1].

З огляду на розвиток мехатронних систем та робототехніки визначені деякі загальні принципи, на яких побудована робота [1–4].

Перший принцип – системне проектування (тобто синтез виробів мехатроніки) на основі загальносистемних критеріїв без декомпозиції на окремі функціональні компоненти. Реалізація цього принципу стала можливою тільки на певному етапі розвитку науки та на шляху його подальшого вдосконалення. Водночас Існує ще багато проблем у формуванні загальносистемних критеріїв і розробки лені методів синтезу на їхній основі.

Другий принцип – поетапна мініатюризація елементів шляхом послідовного освоєння різного порядку розмірностей виробів у вигляді окремих поколінь техніки. Кожне таке покоління вимагає нових відповідних технологій. При цьому Разом із тим для реалізації ідей необхідне технологічне обладнання, що базується на техніці попередньої розмірності.

Наприклад, реалізація цього принципу у мікромехатроніці передбачає розвиток 3D – мехатронних і мікросистемних технологій на основі 2D – технологій мікроелектроніки. Розвиток нанотехнологій передбачає використання мікротехніки (наприклад, мікроманіпуляторів).

Третій принцип – уніфікація функціональних компонентів. У ході мініатюризації для систем (наприклад, дециметрової розмірності) цей принцип реалізується у вигляді модульної побудови із типу розмірних рядів. Вони мають конструктивно уніфіковані функціональні компоненти (рис. 1.4), такі як: енергоживлення, сенсорні, інформаційно-керувальні, виконавчі (приводні) тощо.

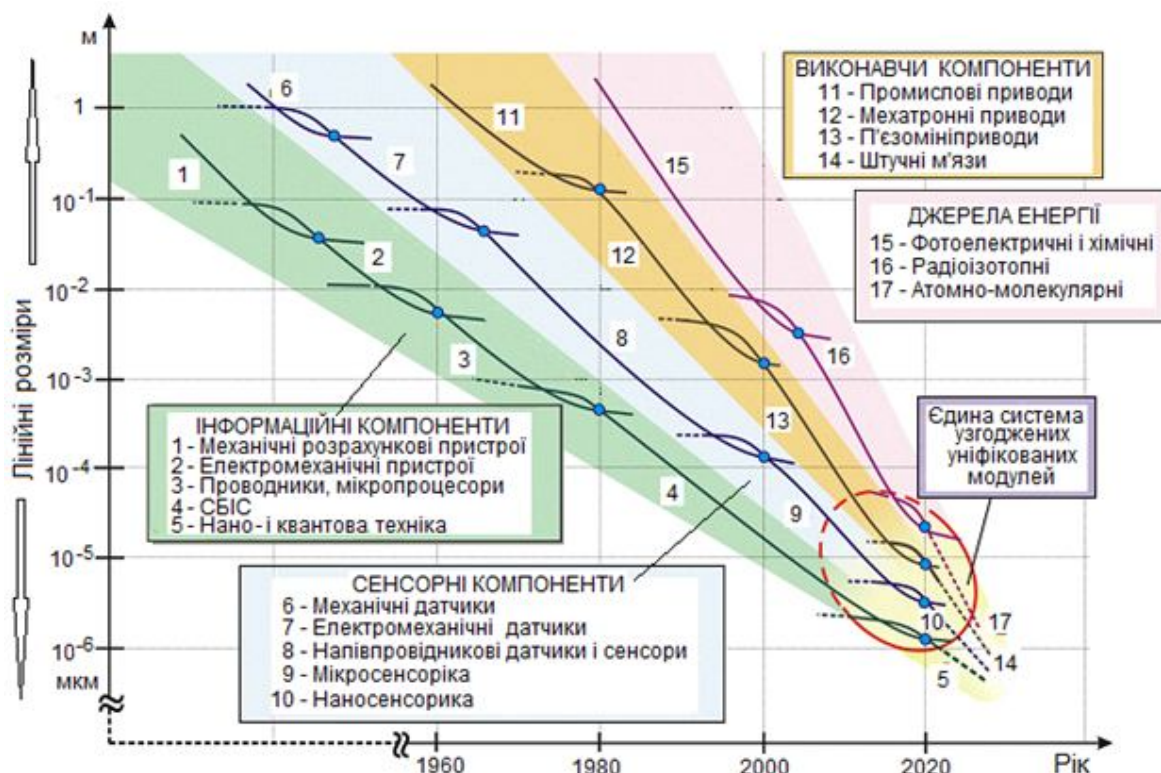


Рисунок 1.4 – Розвиток компонентів і елементної бази мехатроніки [1]

З огляду на головні вимоги щодо компонентів їх можна об'єднати в дві групи: інформаційні та силові.

Зі зменшенням габаритних розмірів елементів виробів до рівня сантиметрової розмірності загальносистемна оптимізація веде до взаємного проникнення (конвергенції) цих функціональних компонентів. Це дає зниження вагогабаритних параметрів, підвищення швидкодії та надійності (насамперед шляхом зменшення міжкомпонентних зв'язків).

Першим освоєним етапом процесу є поширення методів штучного інтелекту з інформаційно-керувальними компонентами, які впливають на інші функціональні компоненти від сенсорних до виконавчих.

Аналогічна тенденція існує в енергоживленні й енергоспоживанні шляхом його децентралізації та введенням вторинних джерел енергії в окремі функціональні компоненти. В основі цих процесів, як і раніше, лежить загальносистемна оптимізація.

Четвертий принцип – це інтеграція функцій на базі однорідних структур. Принцип побудови систем приходить на зміну модульному під час переходу до міліметрової розмірності. Цьому передують зазначене вище поступове взаємне проникнення функціональних компонентів, яке й завершується переходом до якісно нового типу. Такий перехід містить два етапи.

Перший етап охоплює інформаційні компоненти (сенсорні, інформаційно-керувальні, зв'язку), а другий – силові (виконавчі, енергоживлення).

На цей час перший етап реалізується на основі нейроподібних структур. Кожна функція виконується окремими ділянками таких структур із можливістю їх оперативного перерозподілу та зміни меж. Така організація подібна багатоагентній системі в комп'ютерних мережах. Окремі компоненти втрачають свою конструктивну самостійність і перетворюються в програмний продукт, а саме в програмні агенти-модулі, що функціонують в однорідному матеріальному середовищі.

Другий етап освоєння однорідних структур – це реалізація цього принципу в силових функціональних компонентах. Таке завдання вимагає пошуку нових фізичних принципів і шляхів їх технічної реалізації. Дослідження ведуться зі створення приводів за типом «штучних м'язів». Вони складаються з сотень елементарних мікроактуаторів на основі електроактивних полімерів і мають джерела енергоживлення (нанобатареї або нанопаливні елементи). Це сприяє поліпшенню вагогабаритних параметрів приводів і дозволяє кардинально підвищити надійність їхніх компонентів і модулів загалом.

П'ятий принцип – інтелектуалізація як окремих функціональних компонентів, так і загальносистемних функцій. Подальшим розвитком цього принципу буде технічне освоєння творчих (креативних) здібностей людини.

Шостий принцип – це так званий закон ступеня $3/2$. Він належить до мініатюризації та полягає в тому, що завдяки різному порядку розмірностей обсягу (3) і поверхні (2) об'єктів при їхній мініатюризації відбувається збільшення значущості поверхневих явищ. Наприклад, теплообміну із зовнішнім середовищем порівняно з об'ємними явищами (інерцією тощо). У результаті відповідно підлягають перегляду принципи побудови, методи розрахунку та проектування мехатронних систем у процесі їхньої мініатюризації.

Розвиток науково-технічного прогресу ХХ століття спричинив прогрес головних етапів механізації та автоматизації виробничих процесів, унаслідок яких також з'явився термін «мехатроніка» [1–3].

Механізація – заміна ручних знарядь праці машинами й механізмами із застосуванням для їхньої дії різних видів енергії в процесі трудової діяльності [2].

Автоматизація – застосування технічних засобів економічних та математичних методів і систем керування, які частково або повністю

звільняють людину від безпосередньої участі в процесах отримання, перетворення, передачі та використання енергії, матеріалів або інформації.

Складником автоматизації є *автоматика* – галузь теоретичних і прикладних знань про автоматично функціонуючі пристрої та системи.

До поняття автоматизації також належить технічна кібернетика, яка створена на теорії оптимізації використання технічних засобів автоматичного керування та автоматичного регулювання. Такі системи керують пристроями обчислювальних машин, пристроями на базі мікропроцесорної техніки, вимірювальними перетворювачами, виконавчими механізмами, регуляторами технологічних процесів, пристроями реєстрації та відображення інформації тощо [5].

Отже, поступово мехатроніка стає «наукою про все», яка застосовується в багатьох галузях і напрямках.

1.3 Еволюційний розвиток модулів технічних систем

Підготовка та проведення перспективних системних заходів із розроблення створення модулів вимагає всебічного аналізу тенденцій еволюції автоматичних машин і їхніх компонентів. Це відповідає потребам галузей, орієнтованих на використання модульних технічних систем як закінчених виробів, так і компонентів обладнання та продукції.

Після винаходу машин одним із постійних напрямів людської діяльності стала розробка автоматизованих механізмів, а в подальшому й робототехнічних систем. На межі ХХІ століття в процесі створення складних машин виникла стійка тенденція інтелектуалізації алгоритміки керування, яка супроводжується мініатюризацією модулів і компонентів технічних засобів. Вони тісно взаємопов'язані як форма та зміст, так і складники загального процесу розвитку техніки.

Незважаючи на зменшення характерного розміру, технічні системи в загальному випадку, як і раніше, володіють усіма функціональними підсистемами, що є властивими для «великих» машин.

Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем завершуються переходом на якісно нові види техніки (рис. 1.5, де над S-подібними еволюційними кривими наведено назви етапів, а під ними – приклади відповідних типів техніки).

Загальні закони розвитку техніки будь-якої галузі мають основні положення.

1. Закон прогресивної еволюції техніки.

Дія закону прогресивної еволюції в світі техніки є аналогічною дії закону природного відбору Дарвіна в живій природі.

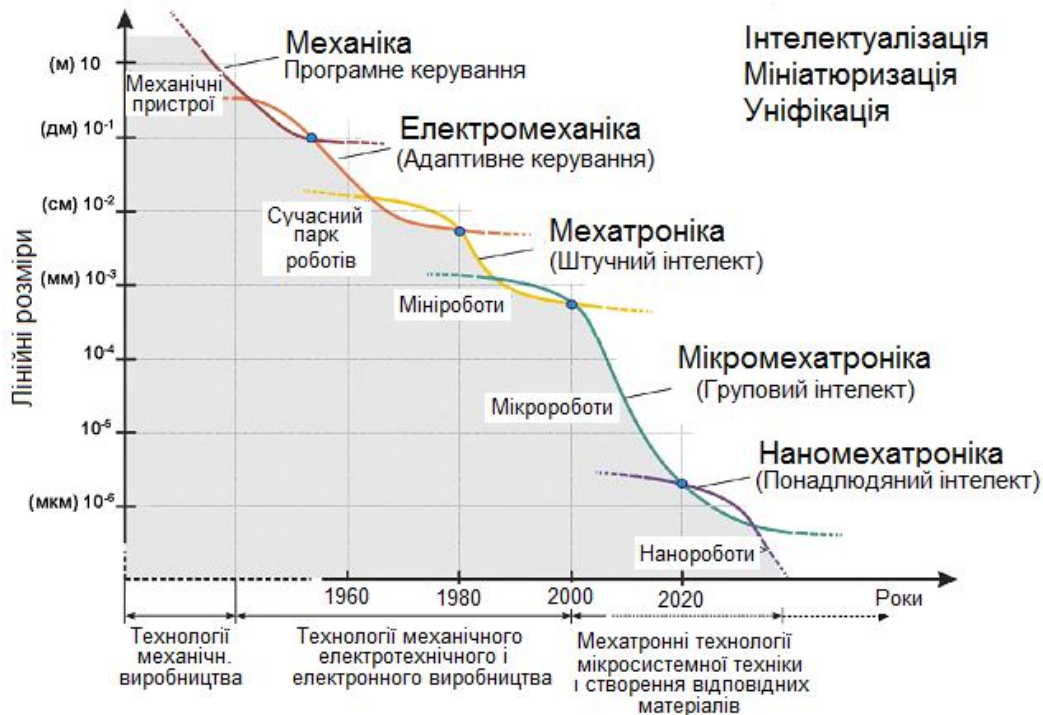


Рисунок 1.5 – Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем [1]

Його сутність полягає у тому, що технічні об'єкти з однаковою функцією при переході від покоління до покоління знижують наявність дефектів за певних техніко-економічних умов. Якщо ж розглядати всі переходи та всю історію конструктивної еволюції певного класу техніки, то можна спостерігати закономірності вичерпання можливостей конструкторсько-технологічних рішень на трьох рівнях. Водночас, поки не будуть досягнуті оптимальні параметри технічних систем, не може відбутися перехід до нового технічного рішення або до нового принципу дії.

2. Закон стадійного розвитку технічних систем.

Будь-яка технічна система у своєму розвитку проходить чотири стадії, які залежать від особливостей функцій і можливості реалізації:

- технологічна функція (обробки предмета);
- енергетична функція (забезпечення технологічного процесу енергією);
- функція керування процесом;
- функція планування, яка реалізує можливості попередніх функцій з урахуванням участі людини.

3. *Закон розширення безлічі потреб-функцій* полягає у створенні технічних систем за наявності потрібного потенціалу та соціально-економічної доцільності.

4. *Закон зростання різноманітності технічних систем* веде до повного задоволення людських потреб, забезпечення високих темпів продуктивності праці й поліпшення інших критеріїв.

5. *Закон зростання складності технічних модульних об'єктів*.

Складність технічних об'єктів з однаковою функцією через дію факторів стадійного розвитку техніки та прогресивної конструктивної еволюції технічних систем від покоління до покоління монотонно та прискорено також зростає.

Технічна модульна система є матеріальною. Її можна вивчати, вдосконалювати, спрямовано видозмінюючи її складники [3–5]. Найважливішими елементами будь-якої технічної модульної системи є робочий орган (виконавчий механізм), джерело енергії (привод), трансмісія (передавальний механізм) і орган керування.

Очевидно, що виконуючи одну й ту саму функцію, технічні модульні системи можуть відрізнятися одна від одної за принципом своєї дії, перетворення енергії та за виконавчими елементами.

1.4 Позиції створення сучасних технічних систем

Класичні рішення у сфері проектування та побудови технічних систем засновані на можливості декомпозиції загальних технічних вимог. Усе це визначається на етапі проектування, а також створення технічного завдання, що широко використовується для машин і комплексів на макро- або мікрорівні.

Спрямоване створення нової технічної системи проходить етапи:

- потреби суспільства;
- виникнення ідеї та пошук відповідних знань;
- визначення принципу дії системи та вибір робочого органу і підбір інших елементів системи.

Підвищення працездатності системи відбувається завдяки вдосконаленню всіх її органів. Проте це вдосконалення відбувається нерівномірно – то один, то інший елемент у своєму розвитку виривається вперед і змушує вдосконалюватися інших. Тому створюються функціональні складові технічних систем, які засновані на базових компонентах будь-якої техніки. Завдяки процесам конвергенції (зближення, сходження компромісів або взаємопроникнення функціональних підсистем) на одній мікроплатформі

створюються сенсорні, інформаційно-керувальні, виконавчі (силові), енергоживлення (рис. 1.6) та інші складові технічної системи.

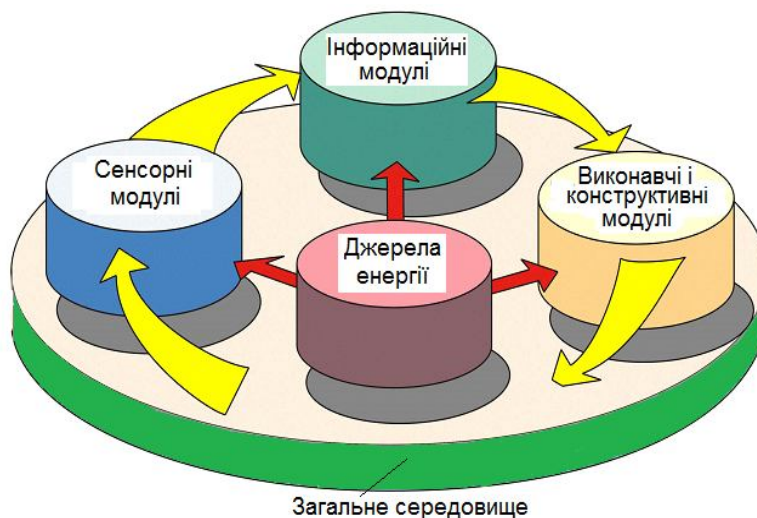


Рисунок 1.6 – Функціональна взаємодія складових технічної системи [1]

Прискорення процесу конвергенції диктується не тільки потребами у мініатюризації, а й тими широкими можливостями, які відкриваються з кожним новим рівнем співпроникнення підсистем. На певних стадіях інтеграції з'являються реальні можливості для здійснення процесів самоорганізації та самовідтворення (рис. 1.7).

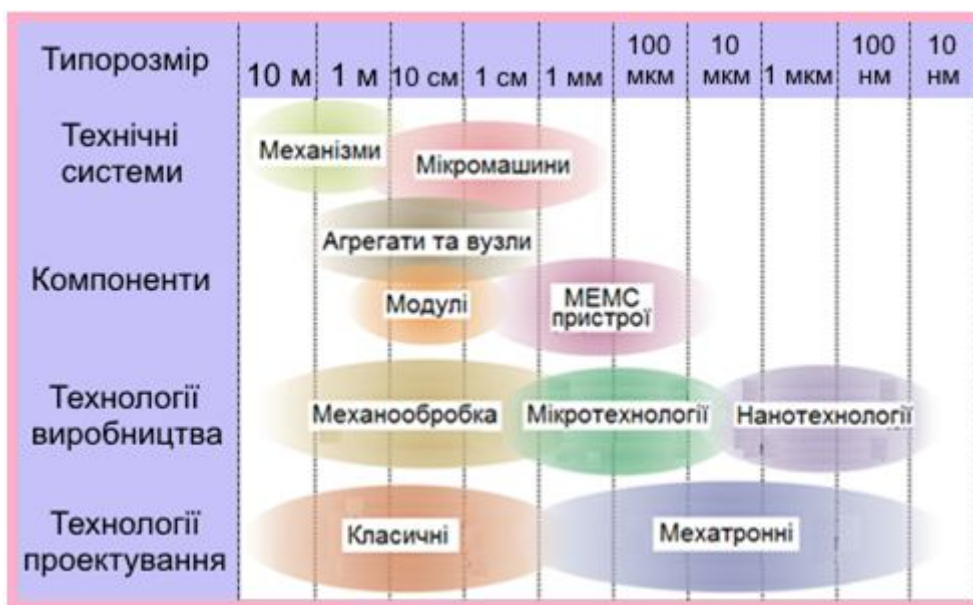


Рисунок 1.7 – Необхідності переходу до електромехатронних технологій у процесі розвитку технічних систем [1]

Розглянемо деякі приклади новітніх комплексних компонентів:

- *енергетичні* – це мініатюрні хімічні джерела струму, у яких полімерні мембрани з нанопористою структурою використовуються як ефективні наповнювачі електроліту;
- *інформаційно-керувальні* – радіаційно-стійкі мікроаналоги електронних ламп, а також мікромехатроники, у яких холодний катод формується з вуглецевих нанотрубок;
- *сенсорні* – це хімічні сенсори на основі транзисторних структур із заздалегідь сформованими хемосорбційними центрами;
- *розподілені* тактильні сенсори, чутливі елементи яких виготовлені з нанокомпозитних матеріалів;
- *давачі* кутових швидкостей і лінійних прискорень для систем орієнтації та навігації, у яких рухомі елементи виготовляються методами вирощування в процесі створення компонента модуля загалом.

Таким чином, технічні системи складаються із сукупності взаємопов'язаних елементів, що утворюють конструкції. Вони призначені для виконання однієї або кількох функцій, які необхідні людині або іншим технічним пристроям.

1.5 Проєктно-технологічний базис мехатронних систем

Функціональний склад мехатронних систем та технологій сприяє створенню модулів та їхній деталізації. Цей процес забезпечує проєктно-технологічний базис. У результаті створюються нові необхідні системи та підсистеми (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Розвиток функціональних компонентів

Наприклад, *сенсорна підсистема* подана давачами, що реалізують функції слуху, дотику, технічного зору, орієнтації та геометричних параметрів об'єкта керування, його положення в просторі з метою навігації тощо.

Виконавча підсистема дає змогу здійснювати переміщення платформи (локомоцію), а також функціональні рухи – закріплення, захоплення, складання, позиціонування тощо. Маніпуляції систем відбуваються шляхом застосування приводів, механічних передач, захватів і інших елементів впливу.

Інформаційно-керувальна підсистема забезпечує збір, обробку та зберігання інформації, генерацію сигналів керування, статичний і динамічний зворотній зв'язок, а також взаємодію з оператором або зовнішньою системою керування більш високого рівня за допомогою прийому-передачі інформації засобами зв'язку.

Енергетична підсистема регулює подачу й розподіл енергії інших підсистем, а також акумулювання енергії від зовнішніх джерел і її зберігання під час функціонування машини. Внутрішні енергокомпоненти можуть бути представлені хімічними, електричними, ядерними, мікровибуховими, пневматичними та іншими подібними джерелами енергії.

На підставі аналізу складових компонентів окремих підсистем як ключових параметрів висуваються базові технічні вимоги (рис. 1.9) і пропонуються характеристики [1].



Рисунок 1.9 – Перелік базових технічних вимог щодо електромехатронних модулів [1]

Найпоширенішими у сучасних конструкціях є сенсорні та інформаційно-керувальні компоненти, які широко засвоєні. Це поліпшує подальші інновації та акцентує увагу при розробці нових підсистем.

Наприклад, розвиток сучасних засобів глобальної навігації забезпечило їхнє широке застосування на побутовому рівні. Це дає змогу прогнозувати оснащення автотранспортних засобів навігаційним обладнанням і використовувати їх як невід’ємні вимоги для подібних систем вже у найближчому майбутньому.

1.6 Комплексні технології пріоритетних напрямків мехатроніки

Наведений аналіз об’єктивної тенденції розвитку підходів щодо побудови технічних систем показує необхідність масштабних заходів системної розробки та програмного впровадження електромехатронних технологій. На цей час це сприяє не тільки подальшій реалізації потреб промисловості в перспективі на найближчі 10–20 років.

На підставі прогнозу й системного аналізу перспективних потреб усіх галузей господарства можливо зробити унікальні пристрої, комплекси та системи у вигляді уніфікованих мехатронних модулів. Такій підхід сприяє охопленню типорозмірного діапазону виробів машинобудування, базуючись на перспективних технологіях виробництва.

Основою такого підходу є сучасні МС-компоненти, що складають технологічний базис. Процес створення функціональних машин (технічних систем) наведений на рисунку 1.10 і відображає застосування технологій комплексування та уніфікації для створення базових мехатронних модулів на конкретних прикладах [1].

Зокрема, застосування мехатронних модулів мікронного типорозміру дає змогу говорити про розробку розподілених систем-компонентів на основі мультиплексування та на базі мікрочипів із високим рівнем інтелектуалізації.

Це забезпечує достовірність і стійкість отриманих даних та інформації. Подібний підхід багаторазово підвищує рівень надійності системи завдяки можливості перенесення частини функцій компонентів, що вийшли з ладу, на інші без істотного зниження технічних характеристик під час виконання критичних операцій.

Комплексний характер підходу до розробки мехатронних модулів вимагає системної інтеграції всіх проведених робіт, що підтверджується досвідом розробки та створення зарубіжних аналогів.

Типовий приклад – інтегровані комп’ютерні виробничі комплекси вітчизняних і закордонних систем.

Науково-технічна актуальність цієї проблеми логічно впливає з переваг технічної модульної системи робототехніки, побудованої на: інтелектуальності, адаптивності, надійності, мініатюрності.



Рисунок 1.10 – Процес створення функціональних модулів і систем [1]

Такі принципи пов'язані між собою та мають загальну теоретичну основу [1, 10, 11].

Істотну специфіку має тільки принцип уніфікації, який визначає особливості застосування робототехніки, а саме:

- широку номенклатуру;
- складність технічних вимог щодо засобів робототехніки, яка часто перебуває на межі можливостей сучасної техніки;
- незначні потреби елементів у окремих типах робототехнічних систем.

Ці особливості є підставою для вирішення завдання уніфікації засобів робототехніки. Визначаючи шляхи їхньої побудови та функціонально конструктивні уніфіковані компоненти створюються мехатронні модулі у вигляді їхніх типорозмірних рядів та програмного забезпечення.

Проте модульна побудова техніки має і свої недоліки, які обумовлені з неминучим деяким завищенням вагогабаритних характеристик і кількості проміжних механічних і електричних з'єднань.

Розвиток мехатроніки та робототехніки як комплексного міжгалузевого науково-технічного напрямку вимагає адекватної державної організації. Саме

так починався розвиток робототехніки.

Наприклад, в Японії, яка визнана лідером у цій сфері, усі досягнення отримані саме завдяки тому, що випереджальний розвиток робототехніки було визнано стратегічним державним завданням. Аналогічний підхід був реалізований і у низці європейських країн.

До головних державних завдань належать:

- визначення номенклатури функціональних компонентів і технічних вимог щодо мехатроніки й робототехніки (з виділенням першочергових потреб) на основі аналізу потреб у коштах.

- уніфікація цих компонентів, їхня розробка й організація промислового випуску. Це дає змогу в 2-3 рази скоротити номенклатуру продукції, а відповідно, і витрати на розробку, підвищити серійність виробництва, знизити вартість та підвищити якість;

- розробка на цій основі першочергових базових мехатронних і робототехнічних систем і комплексів;

- промисловий їхній випуск і відпрацювання в експлуатації.

Відповідно до завдань передбачені такі роботи:

- створення пріоритетних систем мехатроніки та робототехніки нового покоління;

- організація підготовки та перепідготовки кадрів, зокрема організаторів і управлінців.

Програма розвитку загалом повинна бути орієнтована на рішення першочергових найважливіших державних завдань (безпеку, технологічну незалежність, технічне забезпечення, розвиток критичних технологій і видів техніки за пріоритетними напрямками розвитку). Надалі ці рішення повинні тиражуватися та розвиватися для забезпечення інших потреб у коштах мехатроніки й робототехніки.

При розробці й організації виробництва відповідних виробів необхідно керуватися таким:

- створенням виробів, які гарантовано конкурентоспроможні на світовому ринку;

- рішенням задач імпортозаміщення та організації виробництва кращих у світі зразків цієї техніки, але істотно меншою вартістю.

Як зазначено вище, рішення цієї проблеми ґрунтується на подальшому розвитку критичних технологій:

- технології мехатроніки та створення мікросистемної техніки;

- технології створення інтелектуальних систем;

- біоінформаційної технології;

- обробки та захисту інформації;

– біосенсорної технології.

Отже, розглянута комплексна проблема належить відразу до кількох пріоритетних напрямів розвитку науки й техніки. Насамперед, це індустрія наносистем і матеріалів та живих і інформаційно-телекомунікаційних систем. Особливе значення пропонується підхід має для створенні й реалізації технічних засобів та забезпечення безпеки і протидії тероризму.

Контрольні запитання

1. Поняття мехатроніки? Головні завдання мехатроніки.
2. Тенденції розвитку мехатронних систем та наукових напрямів.
3. Головні особливості мехатроніки як галузі науки.
4. Поняття мехатронного модуля.
5. Назвіть принципи синергетики та мехатроніки.
6. Структурні базиси та принципи будови мехатронних систем.
7. Визначення мехатронних об'єктів та їхній зв'язок.
8. Головні принципи, на яких побудована робота мехатронних систем та робототехніки.
9. Поняття механізації та автоматизації.
10. Складники автоматизації.
11. Еволюційний розвиток модулів технічних систем.
12. Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем.
13. Основні положення та загальні закони розвитку техніки будь-якої галузі.
14. Принципи створення сучасних технічних систем.
15. Функціональна взаємодія складових технічної системи.
16. Наведіть приклади новітніх комплексних компонентів.
17. Проєктно-технологічний базис мехатронних систем.
18. Розвиток функціональних компонентів.
19. Перелік базових технічних вимог щодо електромехатронних модулів.
20. Комплексні технології пріоритетних напрямів мехатроніки.

2 ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ

2.1 Тенденції створення електромехатронних систем

Сучасна наука та розвиток техніки й автоматизованих технологій не стоять на місці, а постійно розвиваються. У результаті створюються нові електромеханічні системи, які займають місце механічних систем та елементів. Це сприяє розширенню поняття «мехатроніки», на базі якого можуть створюватися електромехатронні комплекси і системи.

Наразі загальноприйняті відмінності між електромеханікою та мехатронікою полягають у тому, що перша становить комбінацію електричних приводних систем, а також елементів точної механіки і технологічних комплексів. Мехатроніка складається з елементів керування на базі мікросхем, програмного забезпечення і мереж. Основна відмінність між старими мехатронними і новими електромеханічними версіями полягає в тому, що останні пропонують більш гнучкі рішення в проектуванні і експлуатації. Використання нових видів електричної енергії та її перетворення з використанням нових електромеханічних пристроїв об'єднує функції, без яких не можуть існувати сучасні автоматизовані системи. Усе це сприяє створенню поняття «*електромехатроніка*».

У цьому визначенні особливо підкреслена триєдина сутність електромехатронних систем (ЕМС). В основу їхньої побудови покладено ідею глибокого взаємозв'язку механічних, електричних, електронних, комп'ютерних і інших елементів [3].

Методологічною основою розробки електромехатронних систем є паралельне проектування (concurrent engineering methods). Наприклад, під час традиційного створення машин із комп'ютерним керуванням послідовно проводиться розроблення механічної, електронної, сенсорної та комп'ютерної частин систем, а потім вибір інтерфейсних блоків [1, 2, 4].

Функціональний рух електромехатронної системи передбачає її цілеспрямований механічний рух (переміщення), який координується з паралельно керованими технологічними та інформаційними процесами.

В основі побудови електромехатронних систем також є принципи *синергетики*, які використовуються під час проектування електромехатронних виробів і засновані на трьох базових принципах [1]:

- реалізації виробів із мінімально можливою кількістю структурних і конструктивних елементів шляхом об'єднання їх (двох і більше) в єдині багатофункціональні модулі (блоки);
- вибору інтерфейсів (зв'язків між блоками) як локальних точок

інтеграції та виключення надлишкових структурних блоків та інтерфейсів;

- перерозподілу функцій у електромехатронній системі від апаратних блоків до інтелектуальних (комп'ютерних, інформаційних, програмних) компонентів.

Ступінь інтеграції електромехатронної системи є однією з головних класифікаційних ознак, яка сприяє подальшому розвитку інтелектуалізації та мініатюризації.

У сучасних ЕМС для забезпечення високої якості реалізації складних і точних рухів застосовуються методи інтелектуального керування (advanced intelligent control). Ця група методів спирається на:

- нові ідеї в теорії автоматичного керування;
- сучасні апаратні та програмні засоби техніки;
- перспективні підходи до синтезу керованих рухів ЕМС.

Відповідно, електромехатронні технології також базуються на комплексному застосуванні маркетингових, проектно-конструкторських, виробничих, технологічних, комп'ютерних та інформаційних методах і технологіях, які забезпечують повний життєвий цикл електромехатронних виробів.

Методи електромехатроніки і мехатронні технології мають універсальний характер. Вони застосовані як до прикладних інженерних розробок, так і до розробки теоретичної бази побудови складних фізико-технічних систем.

Стрімкий розвиток електромехатроніки у світі – це закономірний процес. Він викликаний принципово новими вимогами ринку до показників якості технологічних машин з урахуванням фізико-технічних процесів у системах.

У машинобудуванні метою та предметом електромехатроніки можна вважати створення й виробництво якісно нових модулів руху та машин на їхній основі. Це необхідно для реалізації заданих функціональних дій елементів і механізмів.

На основі розвитку інтелектуальних систем електромехатроніки створюються мікротехнології, які входять у модульні системи.

Наприклад, на базі створення мікросистемних технологій з'явилися нові напрямки, а саме мікроелектроніка, мікроробототехніка тощо.

Перспективним проривом є проникнення електромехатронних технологій у нанотехнології. Переважно це втілюється у створенні прецизійних пристроїв і приладів та наноструктур (рис. 2.1) з унікальними властивостями (наприклад, тунельний мікроскоп, атомно-силовий мікроскоп,

оптичний лазерний силовий мікроскоп, наноінженерні поверхні деталей, тощо).



Рисунок 2.1. – Тунельний і лазерний мікроскопи [1]

Завдяки революційним рішенням електромехатроніка широко застосовується у таких сферах:

- електроенергетиці (у конструкціях машин і механізмів електроживлення та електроспоживання);
- транспортному машинобудуванні (залізничний та міський транспорт, нетрадиційні транспортні засоби, авіакосмічна техніка, загально-промислові механізми тощо);
- машинобудуванні (автоматизоване машинобудування, верстатобудування, електронне та енергетичне машинобудування тощо);
- робототехніці різного призначення;
- приладобудуванні (контрольно-вимірювальні пристрої та машини, офісна техніка, навігаційні прилади, обчислювальна техніка);
- мікроелектромеханічних системах (мікромашини, мікророботи);
- нанотехнології (мікроскопи, зонди, машини з мікромеханічними обробками поверхонь деталей тощо);
- побутової техніки (автономні пилососи, швейні, пральні, посудомийні машини, холодильні установки тощо);
- медичному та спортивному обладнанні (біоелектричні й екзоскелетні протези для інвалідів, тренажери, масажери, вібратори тощо);
- фото- й відеотехніки (пристрої фокусування відеокамер, програвачі відеодисків тощо);
- поліграфічних машинах;
- інтелектуальних атракціонах.

Цей список постійно поповнюється та розширюється. Очевидно, що ринок електромехатронної техніки динамічно розвивається та має стійку тенденцію до зростання.

Незважаючи на це, у електромехатроніці ще не до кінця сформульовані класифікаційні ознаки через недавню появу цього наукового напрямку. На цей час електромехатроніка є значною мірою долею практиків. Розробка таких теоретичних основ перебуває на початковій стадії. Їй ще далеко, наприклад, до такої аксіоматичної науки, як теоретична механіка.

На цьому етапі найважливіше значення має виявлення сутності нових принципів побудови та тенденцій розвитку сучасних машин і механізмів різних галузей. Робота їх спирається на нові ідеї у теорії керування, сучасні апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки, перспективні підходи до синтезу керованих рухів ЕМС.

2.2 Об'єкти та елементи електромехатроніки

Розподіл функцій електромехатронних систем та створення автоматизованих комплексів вимагають нових особливих вимог [1], до яких належать:

- максимальна швидкість та точність руху робочих органів;
- компактність конструкцій;
- особливості інтелектуального поведіння машин та елементів;
- висока надійність і безпека функціонування.

Це сприяє створенню нових модульних принципів і технологій та методів проєктування сучасних ЕМС з урахуванням базових об'єктів, робото-технічних систем і комплексів різного призначення.

Прикладом такої системи може бути система регулювання силової взаємодії робочого органу з об'єктом робіт при механообробці (рис. 2.2).

У цьому випадку відбувається керування:

- технологічними впливами (тепловими, електричними, електрохімічними) по об'єкту робіт при комбінованих методах обробки;
- допоміжним обладнанням (конвеєрами, завантажувальними пристроями) тощо [1].

До складу будь-якої машини входять: механічна та приводна (електромеханічна) частини і система керування (рис. 2.3) [1, 5].

До елементів механічної частини належать:

- робочий орган (лебідка крана, робоче колесо насоса, фреза металорізального верстата тощо), що виконує корисну механічну роботу (переміщення вантажу, механічну обробку деталі тощо);
- механічна передача, яка змінює швидкість руху або його характер (поступальний замість обертового).

Головним елементом приводної частини є електропривод, який

становить автоматизовану електромеханічну систему. До складу системи входять електричні, механічні, електронні вузли.

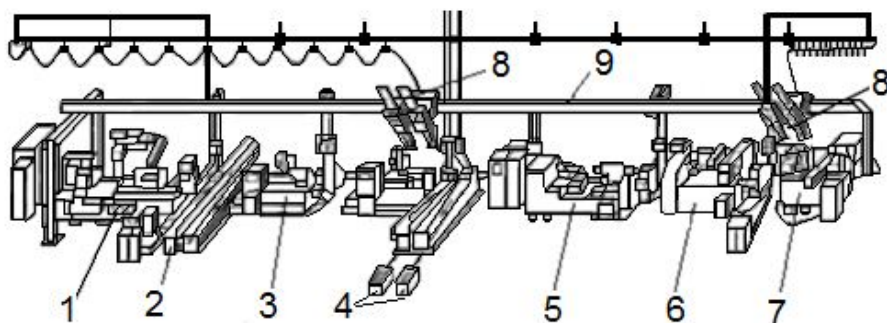
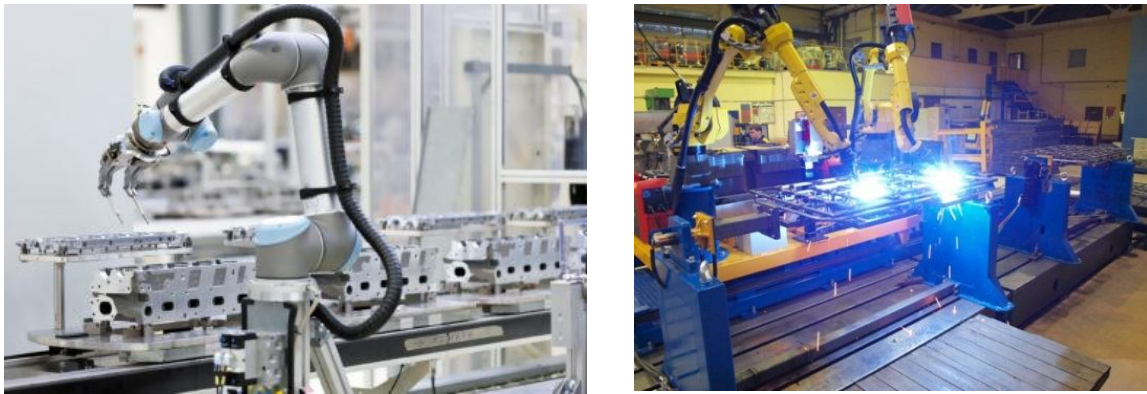


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд роботизованої системи з лінійним розподілом верстатів та основні елементи: 1 – круглошліфувальний верстат; 2 – конвеєр; 3 – зубофрезерний верстат; 4 – тара з деталями; 5 – токарно-гвинторізний верстат; 6 – токарно-копіювальний верстат; 7 – фрезерно-центрувальний верстат; 8 – дворукий підвісний робот; 9 – монорейка

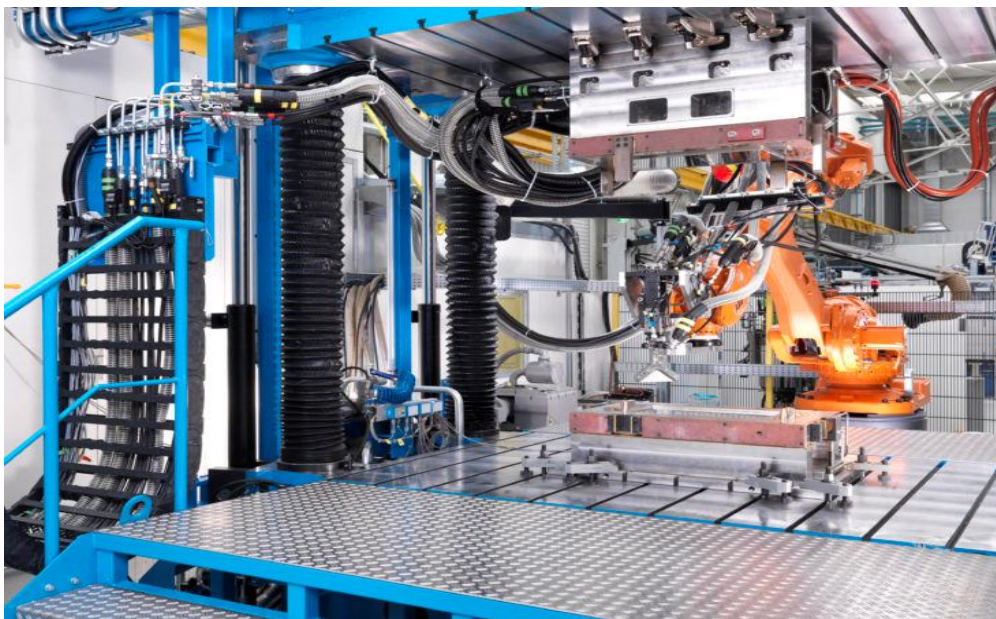


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд основних елементів електромехатронної системи

Якісні показники автоматизованої операції впливають на об'єкт робіт у процесі руху механічного пристрою робочого органу системи. Таким чином механічна частина є об'єктом керування.

У процесі виконання функціонального руху елементів системи зовнішнє середовище (контактні сили, моменти сил і ін.) впливає на робочий орган машини, який є кінцевою ланкою механічної частини.

Крім робочого органу до складу ЕМС входять блок приводів, пристрої комп'ютерного керування, сенсори, що призначені для передачі в пристрій керування інформації про стан блоків машини і їхній рух.

Пристрій комп'ютерного керування виконує:

- організацію управління функціональними рухами ЕМС;
- переміщення робочих органів по складних контурах і поверхнях;
- керування процесом управління механічного руху ЕМС або модулів у реальному часі з обробкою сенсорної інформації;
- взаємодію з оператором через інтерфейс;
- організацію обміну даними з периферійними пристроями, сенсорами і іншими пристроями системи.

Існування комплексної автоматизованої системи неможливо без використання електроприводних систем. Загалом різноманітні електроприводи комплексів та автоматизованих систем споживають разом понад 60 % електричної енергії, що вироблена усіма електростанціями України [1, 2, 5].

Сучасний електропривод складається з електричного двигуна, електронного перетворювача електричної енергії та системи автоматичного керування. За допомогою електроприводів приводяться до руху механізми транспортних засобів, промислової та побутової техніки та інших.

Особливості сучасного електропривода:

- широке використання напівпровідникових перетворювачів енергії для регулювання швидкості електроприводів;
- застосування мікропроцесорних контролерів для реалізації завдань керування електроприводами.

Приклад структури елементів електроприводу зображений на рисунку 2.4 [1]. Розглянемо функції основних елементів.

Мережа електропостачання є джерелом електричної енергії.

Перетворювач електричної енергії використовується для керування потоком електричної енергії, що надходить від мережі до двигуна.

Сучасні перетворювачі виготовляються на базі потужних напівпровідникових елементів. Найпоширенішими різновидами перетворювачів енергії є випрямлячі та перетворювачі частоти.

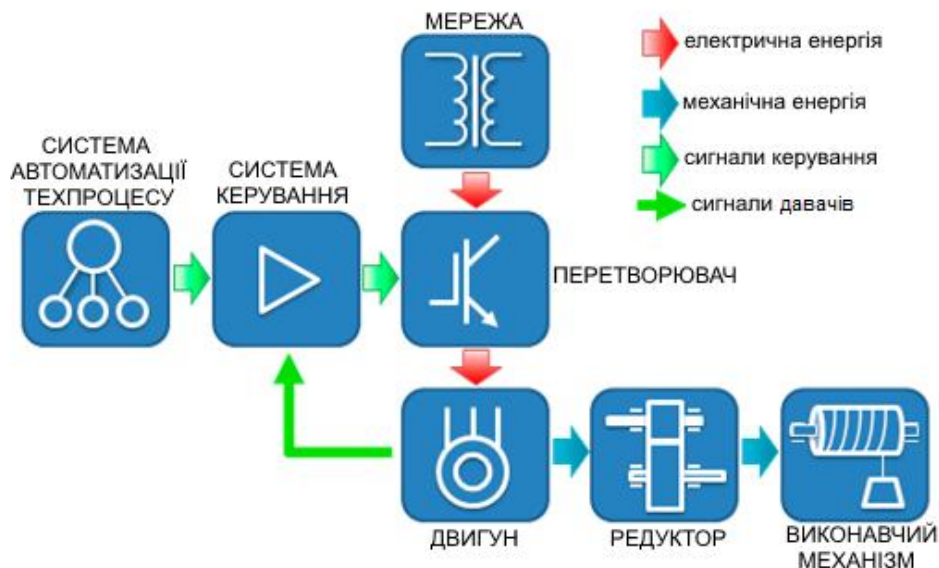


Рисунок 2.4 – Структура сучасного електроприводу промислового механізму [1]

Система автоматичного керування входить до складу перетворювача енергії та має мікропроцесорну систему, яка керує процесом стабілізації швидкості двигуна.

Двигун – це є перетворювач електричної енергії в механічну.

Редуктор використовується для зміни параметрів механічної енергії (наприклад, зменшення швидкості та підвищення моменту або для перетворення обертального руху на прямолінійний).

Виконавчий механізм – це пристрій, який безпосередньо виконує корисну роботу (рух транспорту, підйом вантажу, обертання вентилятора тощо).

Вибір типу приводу залежить від функціонального призначення промислового пристрою (робота або іншого елементу), умов експлуатації, вантажопідйомності, динамічних характеристик і виду системи керування.

Класифікація сучасних електроприводів відбувається:

- у залежності від виду енергії, яка використовується для руху робочого механізму приводу (пневматичні, гідравлічні, електромеханічні і комбіновані);
- із використанням засобів відліку координат: із відносним відліком координат по приростам (кроковий двигун); із абсолютним відліком координат (електропривод зі зворотнім зв'язком).

Таким чином, робота електромехатронних модулів і систем базується на надійній роботі основних елементів, що сприяє визначенню необхідних умов для їхнього подальшого удосконалення.

2.3 Залежність роботи електроприводних систем від динамічних перехідних процесів

Електромехатронна система становить сукупність модулів, що об'єднані загальним режимом функціонування. Тому динаміка роботи електроприводу електромехатронної системи залежить від динаміки окремих вузлів і їхніх параметрів [13].

Для дослідження динамічних властивостей системи необхідно визначити функції елементів та проаналізувати їхню роботу. Загальною формою подання моделі системи є рівняння динаміки, які відображають властивості реальних пристроїв.

Одним із розповсюджених методів є подання властивостей системи у вигляді динамічних характеристик під час виникнення перехідних процесів, що впливають на зміну параметрів модулів.

Розрахунок параметрів базується на рішенні диференціальних рівнянь першого, другого та третього порядку. Це залежить від виконавчих функцій елемента та його поведінки під час технологічного процесу. Такі характеристики дозволяють визначити зміни процесів у часі [13].

Основними параметрами динамічних характеристик є: коефіцієнт посилення k і постійна часу T . Її реакція на вхідний вплив $v = \text{const}$ становить експоненту (рис. 2.5). Швидкість загасання характеристики залежить від часу T , а при статичному положенні, відповідає $y^0 = W(0)$.

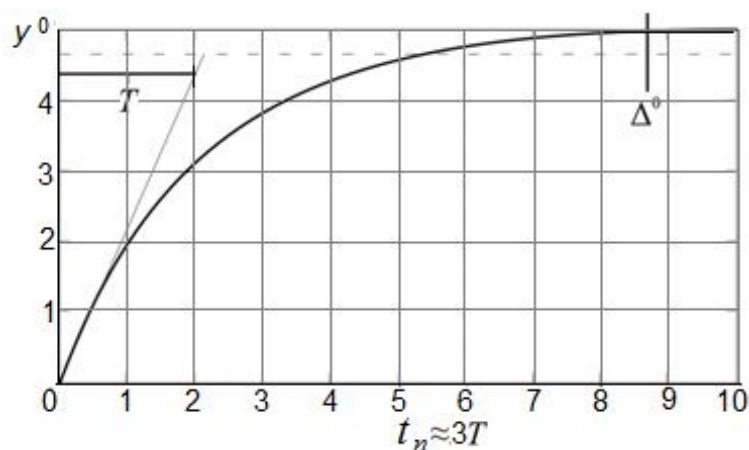


Рисунок 2.5 – Перехідний процес у системі першого порядку [13]

Динамічні властивості такої системи визначає передавальна функція $W(p)$ (де p – оператор диференціювання):

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \quad . \quad (2.1)$$

Якщо така система (2.1) має тільки один корінь характеристичного рівняння $\lambda = -\frac{1}{T}$, то вплив вхідного сигналу $\eta = \frac{1}{T}$. Час перехідного процесу складає $t_n \approx 3T$.

Таким чином, коефіцієнт k визначає стале значення перехідних процесів, а постійна часу T – їхню тривалість.

Поводження багатьох модулів можна описати рівняннями не вище третього порядку. Тому важливо встановити взаємозв'язок між параметрами математичної моделі та якістю перехідних процесів, що протікають в електроприводних системах ЕМС. Особливістю таких процесів є значне коливання контурів. Це не припустимо під час роботи системи. Такий вплив коливань необхідно знижувати.

Наприклад, процеси в системах рівнянь другого порядку та їхня тривалість залежать від трьох параметрів: коефіцієнта посилення k (від якого залежить стале значення), постійної часу T і коефіцієнта демпфірування d , який визначає схильність процесів до коливань (рис. 2.6) [13].

Передаточна функція такої системи має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2dT p + 1} . \quad (2.2)$$

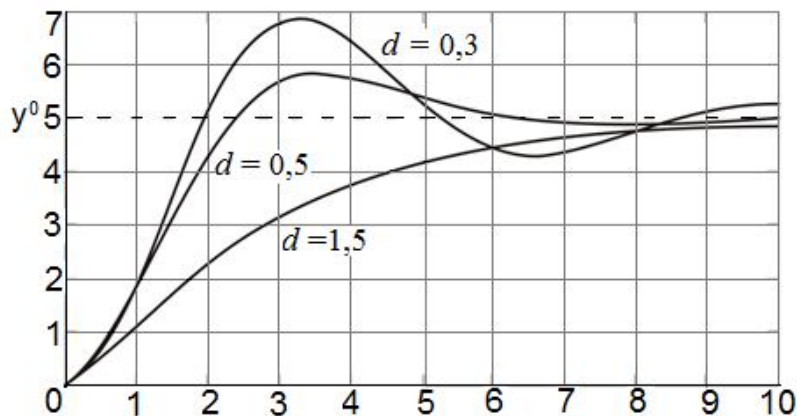


Рисунок 2.6 – Перехідні процеси в системі другого порядку

У системах другого порядку для наближеної оцінки процесу можна користуватися співвідношенням: $t_n \cong \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{\delta^0}$, (де δ^0 – вхідний вплив за навчальних умов), але тільки в тому випадку, коли коефіцієнт демпфірування змінюється в діапазоні $0,5 < d < 1$.

Вираз для коренів характеристичного рівняння системи:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{d \pm \sqrt{d^2 - 1}}{T} \quad (2.3)$$

дозволяє визначити коливальність у вигляді:

$$\mu = \frac{\sqrt{1 - d^2}}{d} \quad (\text{за } d < 1), \quad (2.4)$$

а отже, і її перерегулювання.

За $d \geq 1$ перехідні процеси в системі мають аперіодичний характер.

При розгляданні їх у системах третього порядку використовуються такі базові параметри: k , T , A і B , від яких залежить робота модулів або елементів.

Наприклад, сталі значення для вихідної змінної залежить тільки від коефіцієнта посилення k , інерційність процесів великою мірою залежить від постійної часу T , а коливальні властивості і стійкість системи визначаються параметрами A і B .

Властивості такої системи визначає передавальна функція:

$$W(p) = \frac{k}{T^3 p^3 + AT^2 p^2 + BTp + 1} . \quad (2.5)$$

Для дослідження цієї залежності користуються діаграмою Вишнеградського [13], яка побудована на основі нормованого характеристичного рівняння заміною оператора p на $q = Tp$:

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0 . \quad (2.6)$$

Про якість роботи системи можна говорити тільки за наявності її стійкості, яка буде спостерігатися у разі виконання умови $AB > 1$ (що відповідає критерію Гурвіца).

Розглядаючи значення параметрів A і B з області стійкості, виділяють підобласті з різним розподілом коренів характеристичного рівняння (2.6), які мають різні процеси. Характерний виляд перехідних процесів, відповідних кожної підобласті, зображений на рисунку 2.7.

Відповідно на рисунку 2.7 цифрою «1» позначені типові процеси в системі за таких значень параметрів A і B , коли корені характеристичного рівняння (2.6) речові. У цьому випадку перехідні процеси мають аперіодичний характер.

Якщо параметри A і B обрані так, що речовинний корінь розташовується ближче до уявної осі, ніж пара комплексно-сполучених коренів, то коливальна складова затухає швидше і процеси в системі матимуть вигляд, поданий кривою «2».

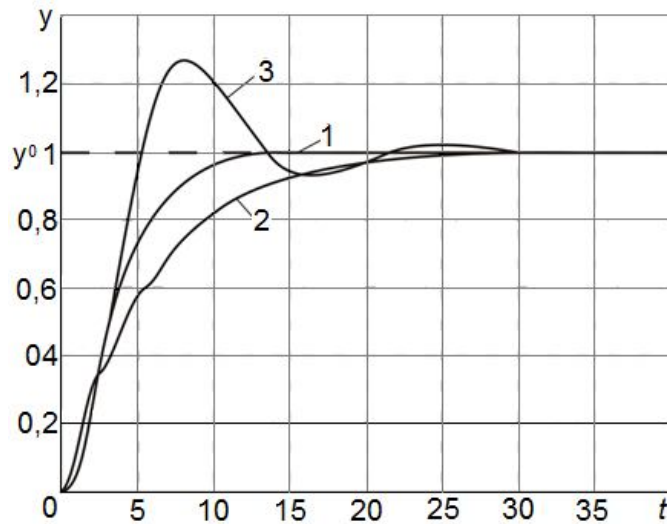


Рисунок 2.7 – Перехідні процеси в системі третього порядку [13]

Параметрам A і B відповідають такі корені, що наближені до уявної осі і мають комплексно-сполучені корені. Процеси в системі мають коливальний характер (крива «3»).

Для того щоб визначити, якою якістю будуть володіти перехідні процеси в системі третього порядку за конкретних значень параметрів A і B , можна також скористатися діаграмою Вишнеградського (за необхідності – уточненою діаграмою), яка наводиться в довідковій літературі [13].

Якість перехідних процесів також можна досліджувати за частотними характеристиками системи, які легко обчислюються або можуть бути отримані експериментальним шляхом. Частотний метод дозволяє оцінити реакцію системи на стрибкоподібний вхідний вплив за нульових початкових умов. Найбільш зручною для аналізу є речова частотна характеристика (РЧХ, рис. 2.8).

На її основі можна отримати різні оцінки якості перехідного процесу. Найбільш зручними є такі:

- початкове значення перехідної характеристики $h(0)$ дорівнює кінцевому значенню РЧХ, тобто $h(0) = R(\infty)$;
- стає значення перехідної характеристики $h(\infty)$ відповідає початковому значенню РЧХ, тобто $h(\infty) = R(0)$;

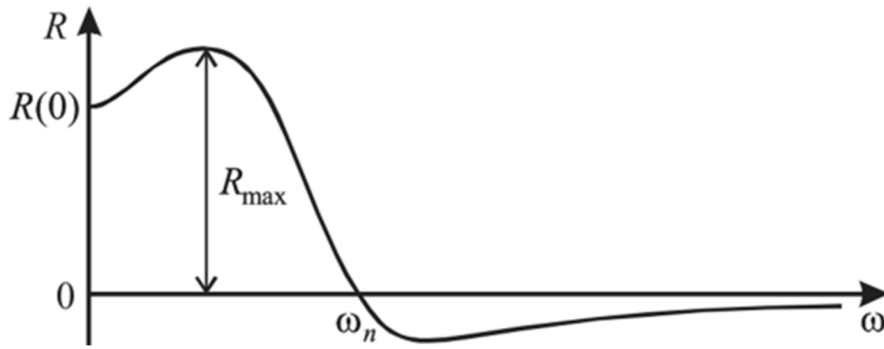


Рисунок 2.8 – Приклад речової частотної характеристики системи [13]

– якщо РЧХ залежності $R(\omega)$ є позитивною незростаючою функцією, то перерегулювання в системі дорівнює $\sigma \% \leq 18 \%$;

– перехідна характеристика має монотонний характер, якщо $dR(\omega)/d\omega$ становить негативну, спадаючу по модулю безперервну функцію.

У разі, коли РЧХ є локально зростаючою функцією, перерегулювання наближено оцінюється за формулою:

$$\sigma \% < \left(\frac{1,18R_{max} - R(0)}{R(0)} \right) 100\% , \quad (2.6)$$

Тривалість перехідного процесу обернено пропорційна частоті ω_n , тобто

$$t_n = \frac{k\pi}{\omega_n}, \quad k = (1 \dots 4) , \quad (2.7)$$

де коефіцієнт k залежить від перерегулювання σ .

Більш повно взаємозв'язок РЧХ з якістю перехідного процесу подана в [13].

Отже, ЕМС нового покоління має тенденцію зростання необхідних функцій інтелектуальних (електронних, комп'ютерних, інформаційних), із яких складаються модулі та системи керування пристроями або механізмами. Робота таких систем залежить від динаміки роботи електроприводу, що визначається базовими параметрами та впливами коливального контуру.

2.4 Особливості електромехатронних модулів

На цей час існує реальна інтелектуалізація виконавчих електромехатронних модулів руху на приводному рівні машин і механізмів у різних галузях.

Наприклад, деякі сучасні електромехатронні модулі все частіше застосовуються в різних транспортних системах (електровелосипеди, ролери, інвалідні коляски, електромобілі з автономними джерелами живлення) [1].

Модулі таких систем можуть складатися з окремих електромехатронних елементів (компонентів). Залежно від характеру виконавчих функцій їх умовно можна поділити на деякі групи.

Електромехатронний модуль руху (ЕММР) – це конструктивно й функціонально самостійний виріб, що складається з механічної (гідравлічної, пневматичної) та електротехнічної частини, а також електронної і інформаційної частин. Такий модуль можна використовувати індивідуально й у деяких комбінаціях з іншими модулями. Прикладами ЕММР є мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-барабан (рис. 2.9), електрошпинделі, тощо [1].



Рисунок 2.9 – Модулі руху: мотор-колесо, мотор-барабан [1]

Інтелектуальний електромехатронний модуль руху (ІЕМР) становить конструктивний і функціонально самостійний виріб із синергетичною інтеграцією механічної (гідравлічної, пневматичної), електричної, електротехнічної, електронної та комп'ютерної (мікропроцесорної) частин [1].

Обов'язково всі ІЕМР мають додаткові елементи, які відрізняють їх один від одного, але загалом об'єднує їхню можливість використання індивідуально або, у деяких комбінаціях, з іншими модулями і в електромехатронних комплексах.

Приклад інтелектуальних елементів електромехатронного комплексу подано на рисунку 2.10.

Інформаційно-вимірювальні електромехатронні модулі призначені для збору, обробки, передачі, зберігання та подання достовірної інформації у зручному для обчислювальної техніки вигляді та для реалізації керування електромехатронними системами [1].

Електромехатронні модулі систем управління та комплексів призначені для керування складними динамічними об'єктами і припускають багаторівневу ієрархічну структуру.

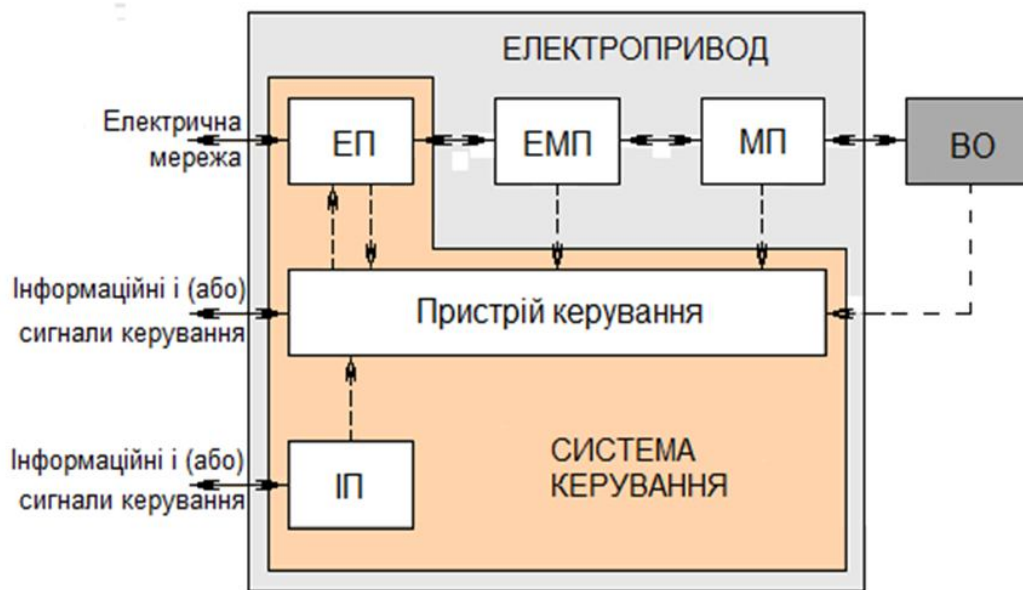


Рисунок 2.10 – Елементи інтелектуальних електромехатронних модулів [1]

Вона містить стратегічний, тактичний і виконавчий рівні керування, які мають доступ до інформаційно-вимірювального електромехатронного модуля. Використання такого складу структури сприяє вирішенню завдань керування на кожному ієрархічному рівні управління електромехатронної системи [1].

Загалом, складність завдань керування електромехатронними системами обумовлює доцільність і необхідність їхнього вирішення з залученням методів і технологій штучного інтелекту.

Практикується конструктивне вбудовування різноманітних мехатронних елементів у конструкцію мехатронних модулів.

У визначенні електромехатронних систем також декларується необхідність їхньої інтелектуалізації шляхом застосування інтелектуальних систем керування [1,5].

Синтез елементів руху й електромехатронного модуля керування сприяє створенню інтелектуальної електромехатронної машини.

Інтелектуальна електромехатронна машина (ІЕМ) – це інтелектуальна багатовимірна система, побудована на електромехатронних принципах і технологіях. Така система здатна ефективно виконувати програми функціональних рухів в умовах нечіткої та неповної інформації про експлуатаційну характеристику машини і параметри зовнішнього середовища [1].

Водночас із розвитком техніки вузли ІЕМ різного фізичного походження (механічні, електричні, електромеханічні, електронні, інформаційні) поступово об'єднуються в єдиний конструктивний електромехатронний комплекс. Унаслідок створення автоматизованих систем узагалі складаються функціональні схеми електромехатронних систем. Наприклад, на рисунку 2.11 показана функціональна схема електромехатронної системи, яка має три підсистеми: інформаційну, енергоелектронну та електромеханічну [1, 7].

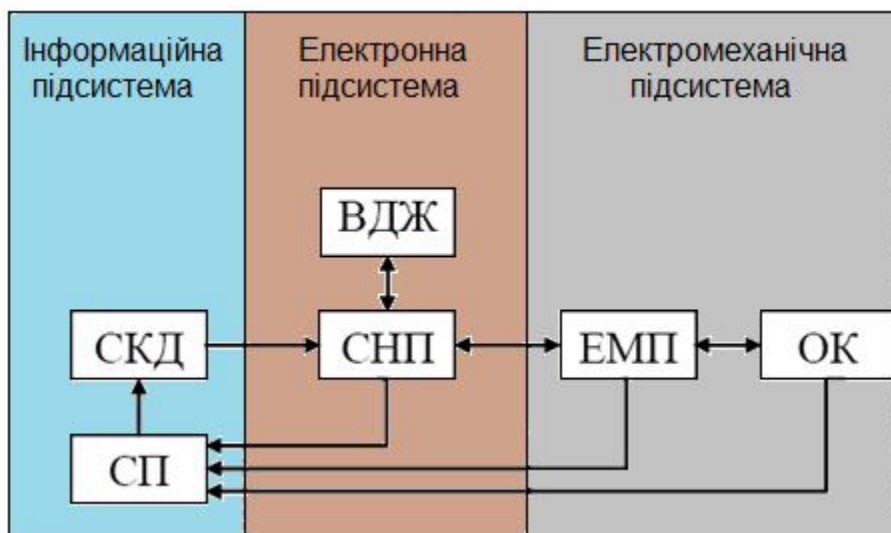


Рисунок 2.11 – Функціональна схема електромехатронної системи

Інформаційна підсистема містить систему керування та діагностики (СКД) і блок сенсорних пристроїв (СП).

Енергоелектронна підсистема складається з силових напівпровідникових перетворювачів (СНП) і вторинного джерела живлення (ВДЖ).

Електромеханічна підсистема містить об'єкт керування (ОК), зазвичай виконаний у вигляді приводу, та електромеханічний перетворювач (ЕМП).

Серед особливостей таких ЕМС відокремлюють:

- можливість зміни параметрів в ОК;
- створення математичних моделей на основі методів ідентифікації.

Функціональні дії ЕМП є конструктивною ланкою об'єкта керування, що має оригінальне конструктивне виконання. Керування потоком енергії від ВДЖ до ЕМП здійснюється СНП. Об'єднання ВДЖ, СНП і ЕМП створюють електромехатронну енергетичну підсистему (ЕМЕП), яка має нові властивості, що відсутні в окремо взятих блоках.

Електромехатронна енергетична підсистема зазвичай є нелінійною, імпульсною підсистемою з параметрами, що змінюються дискретно. Завдяки цьому аналіз ЕМЕП, а також синтез керування потребує застосування методів, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях.

Розрахунок та проектування електромехатронної системи складається з:

- побудови спільної моделі цифрової, імпульсної та аналогової частин;
- дослідження статичних і динамічних характеристик системи, а також аналогової та імпульсної частин регулятора.

Приклад функціональної схеми (див. рис. 2.10) показав, що головним принципом керування електромехатронних систем є принцип зворотнього зв'язку, який дає змогу здійснювати контроль якості регулювання за відхиленням керованого параметра від заданого.

2.5 Рівні інтеграції електромехатронних систем

Сучасна побудова електромехатронних пристроїв базується на використанні досягнень точної механіки, електроприводу, електроніки, комп'ютерного керування.

З урахуванням особливостей роботи електромехатронні пристрої загально визначаються за низкою ознак та принципами [1]:

1. Наявність інтеграції функціональних елементів:
 - вихідної механічної ланки (ВМЛ), яка виконує зовнішні функції;
 - вихідної ланки двигуна у складі з механізмом передачі руху до ВМЛ;
 - підсилювача-перетворювача енергії живлення двигуна;
 - пристрою цифрового програмного керування приводом;
 - інформаційної системи, яка контролює стан зовнішнього середовища та внутрішніх параметрів електромехатронного пристрою.
2. Мінімум перетворень інформації та енергії (наприклад, пряме цифрове керування безредукторним приводом).
3. Використання одного й того самого елемента електромехатронного пристрою для реалізації декількох функцій з однаковими параметрами (наприклад, параметри двигуна: струм, значення моменту, частота обертання, тощо), що відповідає принципу поєднання функцій.
4. Проектування функцій спільного виконання різних елементів

електромехатронного пристрою без їхнього дублювання та з максимальним ефектом (принцип синергетики).

5. Об'єднання корпусів вузлів електромехатронного пристрою (принцип поєднання корпусів).

Пристрій комп'ютерного керування здійснює функції:

- керування процесом механічного руху електромехатронного модуля або багатовимірної системи у реальному часі з обробкою сенсорної інформації;

- організації керування функціональними рухами електромехатронної системи, яка передбачає координацію керування її механічним рухом і супутніми зовнішніми процесами. Зазвичай для реалізації функції керування зовнішніми процесами використовуються дискретні входи/виходи пристрою;

- взаємодії з системою «людина – оператор» через машинний інтерфейс у режимах автономного програмування (режим «офлайн») і безпосередньо у процесі руху електромехатронної системи (режим «онлайн»);

- організації обміну даними з периферійними пристроями, сенсорами й іншими пристроями системи.

Якісно нові властивості електромехатронних модулів, порівняно з традиційними приводами, досягаються шляхом синергетичної інтеграції складових елементів.

Сучасне поняття синергетичної інтеграції трактується як не просто з'єднання окремих частин у систему за допомогою інтерфейсних блоків, а побудова єдиного приводного модуля через конструктивне об'єднання й навіть взаємопроникнення елементів, які мають зазвичай різне фізичне походження.

Призначення електромехатронних модулів є реалізацією заданого керованого руху, однією керованою координатою. Визначення функціональних особливостей сприяє створенню та компонуванню складних багатокоординаційних електромехатронних систем (рис. 2.12).

Сутність електромехатронного підходу до проектування полягає в об'єднанні в єдиний приводний модуль складників.

Застосування електромехатронного підходу до проектування модуля руху базується на визначенні можливих точок інтеграції елементів у структурі приводу. На такій основі та з урахуванням техніко-економічного й технологічного аналізу приймаються конкретні інженерні рішення на проектування та виготовлення модуля руху.

Наприклад, на вхід електромехатронного модуля надходить інформація про мету руху, яка формується верхнім рівнем системи керування. Виходом є

цілеспрямований електромехатронний рух кінцевої ланки (переміщення вихідного валу модуля).

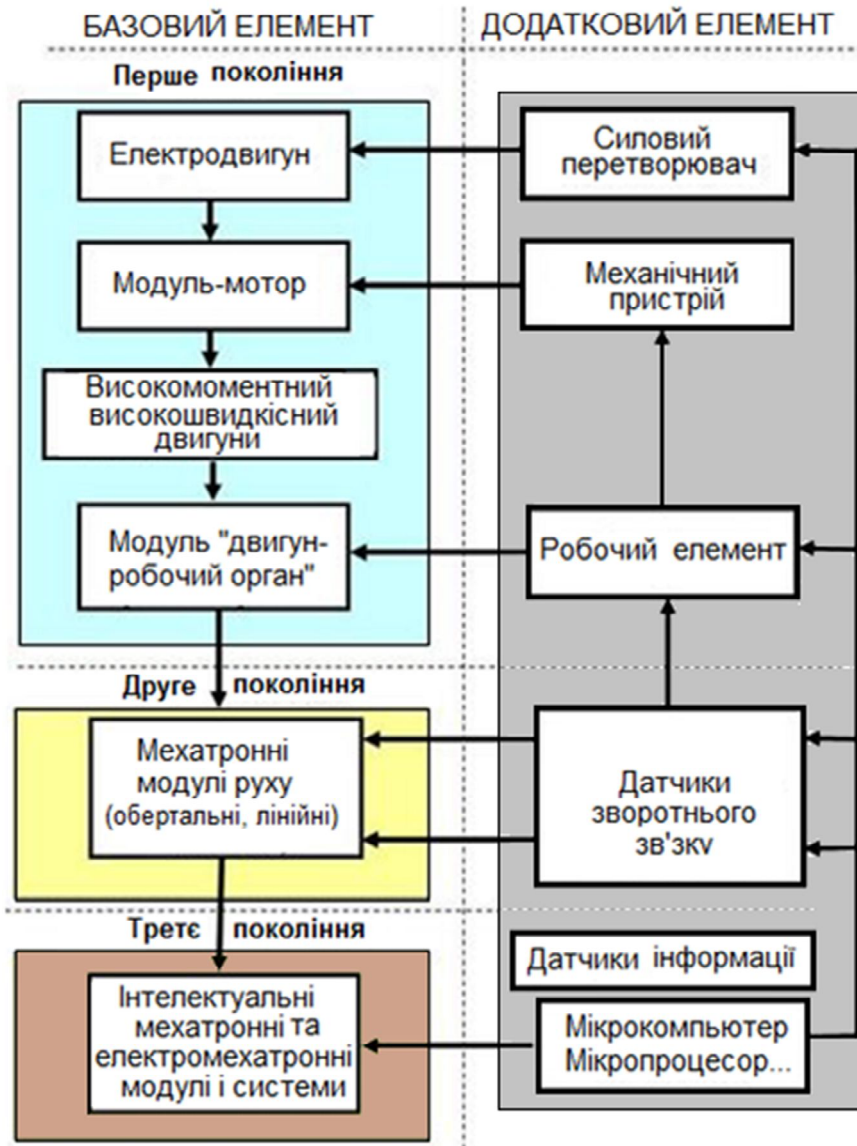


Рисунок 2.12 – Схема розвитку електромехатронних модулів та систем

Отже, для фізичної реалізації електромехатронного модуля теоретично необхідні чотири функціональних блоки, які послідовно з'єднані. Наприклад, інформаційно-електричний і електромеханічний, функціональний перетворювачі у прямому ланцюзі та електроінформаційний і механіко-інформаційні перетворювачі в колі зворотнього зв'язку.

Таким чином, як основна класифікаційна ознака в електромехатроніці є доцільним прийняти розвиток та рівень інтеграції інтелектуальних складових елементів.

2.6 Інтелектуальні модульні системи електромехатронних комплексів

Модульні системи електромехатронних комплексів складаються з механічної, електромеханічної (приводної) частин, а також системи керування [4, 11,12, 14].

Елементи механічної частини:

- робочий орган (лебідка крана, робоче колесо насоса, фреза металорізального верстата), що виконує корисну механічну роботу (переміщення вантажу, механічну обробку деталі тощо);
- механічна передача, яка передає швидкість руху або його характер (наприклад, поступальний замість обертового) іншій системі.

Завданням електромеханічної частини (наприклад, електроприводу) є перетворення електричної енергії в механічну та приведення в рух робочих органів електромеханічних елементів.

Електромеханічна приводна частина складається з електричного двигуна й електронного силового перетворювача, що перетворює електроенергію, яка споживається із джерела (системи електропостачання) до вигляду, придатного для живлення обмоток двигуна. Саме через цей перетворювач і здійснюється керування швидкістю, зусиллями, положенням валу двигуна та робочого органу.

Останнім часом у побудові електромеханічних комплексів нового покоління спостерігається тенденція передачі все більшої кількості функцій від механічних вузлів та електромеханічних до інтелектуальних (електронних, комп'ютерних, інформаційних). З інтелектуальних функцій складається система керування електромехатронним комплексом (ЕМК).

В основі ключового елементу електромехатронних систем є модуль руху, який об'єднує в одному комплексі приводний електричний двигун та індустріальний редуктор. Це підвищує надійність роботи електричних машин, спрощує їхнє розроблення та розрахунок основних параметрів.

Наприклад, робота вантажопідйомного механізму лебідки (рис. 2.13) характеризується циклічністю процесів і повторно-короткочасним режимом роботи електродвигуна.



Рисунок 2.13 – Вантажопідйомний механізм лебідки

Увесь цикл роботи електродвигуна поділяється на такі етапи: підйом вантажу, поворот стріли, спуск вантажу, вивантаження, підйом гака без вантажу, поворот стріли, спуск гака, завантаження.

Кожному етапу відповідає певне навантаження електродвигуна. Під час підйому вантажу момент, створюваний вантажем на барабан лебідки:

$$M_b = \frac{g(m + m_0)d_b}{2}, \quad (2.8)$$

де g – прискорення вільного падіння;

m – маса вантажу, що піднімається;

m_0 – маса гака;

d_b – діаметр барабана з намотаним на нього канатом.

Статичний момент опору на валу електродвигуна за номінальної маси m_{nom} вантажу:

$$M_1 = \frac{M_{b.nom}}{j\eta_{meh}} = \frac{g(m_{nom} + m_0)d_b}{2j\eta_{meh}}, \quad (2.9)$$

де j – загальне передавальне число механізму приводу лебідки;

η_{meh} – коефіцієнт корисної дії (ККД) механічних передач лебідки.

Спуск вантажу відбувається під дією сили тяжіння і електродвигун розвиває гальмівний момент, віддаючи при цьому енергію в мережу.

Статичний момент на валу електродвигуна:

$$M_2 = -\frac{g(m_{nom} + m_0)d_b}{2j} \cdot \eta'_{meh}, \quad (2.10)$$

де η'_{meh} – зворотний ККД під час спуску вантажу.

При підйомі вільного гака момент, що розвивається електродвигуном:

$$M_0 = \frac{gm_0 d_b}{2j\eta_{meh}}. \quad (2.11)$$

За цього режиму втрати на тертя елементів значно більші відносно корисного моменту і механічного ККД, який має менше значення (менше 0,5).

Унаслідок труднощів точного визначення η_{meh} при підйомі й опусканні вільного гака з достатнім ступенем точності можна прийняти для підйому і опускання: $M_0 = (0,1-0,2) M_1$.

Розрахункову потужність електродвигуна вантажної лебідки визначають на підставі таких вихідних даних:

- маси m вантажу, що піднімається;
- швидкості v підйому і спуску вантажу;
- висоти підйому H_1 і спуску вантажу H_2 ;
- передавального числа редуктора j ;
- діаметра барабана лебідки d_b ;
- механічного ККД передачі η_{meh} .

Розрахунковою потужністю, по якій вибирають електродвигун, вважають потужність, що необхідна для підйому номінального вантажу із заданою швидкістю.

Номінальна кутова швидкість за сталого режиму:

$$\omega_{nom} = \frac{2jv}{d_b}, \quad (2.12)$$

а крутий момент двигуна за цього режиму дорівнює M_1 .

Потужність з урахуванням перевантажувальної здатності двигуна λ , кВт,

$$P = \frac{M_1 \omega_{nom}}{1000\lambda}. \quad (2.13)$$

За визначенням (2.12) вибирається двигун відповідно до умов: $P_{nom} \leq P$.

Обраний електродвигун також перевіряється на нагрівання за повний цикл роботи. Перевірка виконується шляхом побудови діаграм моментів і визначення середнього квадратичного моменту.

Для побудови діаграми моментів розраховується час роботи двигуна на кожному етапі.

На етапі підйому та спуску вантажу:

$$t_1 = \frac{H_1}{v}, \quad t_2 = \frac{H_2}{v_2}, \quad (2.14)$$

де t_1, t_2 – час роботи двигуна на підйомі та спуску вантажу;

v_2 – швидкість опускання вантажу:

$$v_2 = v \frac{\omega_2}{\omega_{nom}}, \quad (2.15)$$

де ω_2 – кутова швидкість двигуна, відповідна моменту M_2 (визначається по його механічній характеристиці).

Час підйому (t_3) та спуску (t_4) гака без вантажу:

$$t_3 = \frac{H_2}{v_0}, \quad t_4 = \frac{H_1}{v_0} \quad (2.16)$$

де v_0 – швидкість підйому і опускання гака без вантажу, яка розраховується аналогічно розрахунку швидкості v_2 .

На підставі отриманих результатів будується навантажувальна діаграма (рис. 2.14) моментів за весь цикл роботи електродвигуна.

Еквівалентний момент циклу:

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_0^2 (t_3 + t_4)}{t_{\text{ц}}}}. \quad (2.17)$$

Відносна тривалість увімкнення двигуна:

$$ПВ = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{t_{\text{ц}}} \quad (2.18)$$

дає можливість визначити розрахунковий момент:

$$M_{calc} = \frac{M_{ekv}}{\sqrt{ПВ}} . \quad (2.19)$$

Для нормальної роботи електродвигуна без перегрівання необхідно, виконання умови:

$$M_{nom} \geq M_{calc} . \quad (2.20)$$

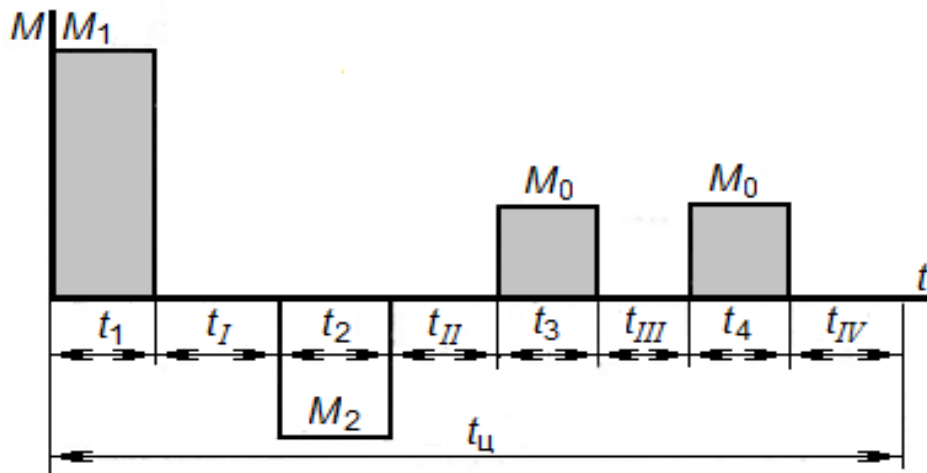


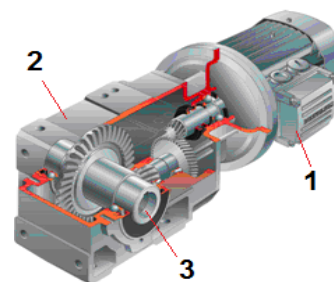
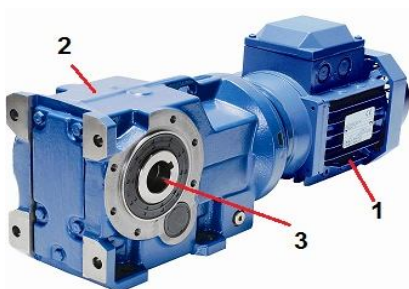
Рисунок 2.14 – Діаграма моментів за цикл роботи вантажної лебідки:

$t_{ц}$ – час повного циклу, t_1 і t_{II} – час повороту стріли;

t_{III} – час розвантаження t_{IV} – час навантаження

Використовуючи традиційні методи розрахунку параметрів електродвигуна, можна обрати необхідний електродвигун для кожної системи або модуля, якщо він задовольняє необхідним умовам.

Мініатюризація засобів силової та керувальної електроніки дала можливість конструктивно об'єднати з електромеханічними вузлами ще й електронні. З'явилися інтелектуальні електромехатронні модулі (ІЕММ) у вигляді двигунів і мотор-редукторів із силовими перетворювачами (наприклад, перетворювачами частоти) на борту [1] пристроїв (рис. 2.15 та рис. 2.16).



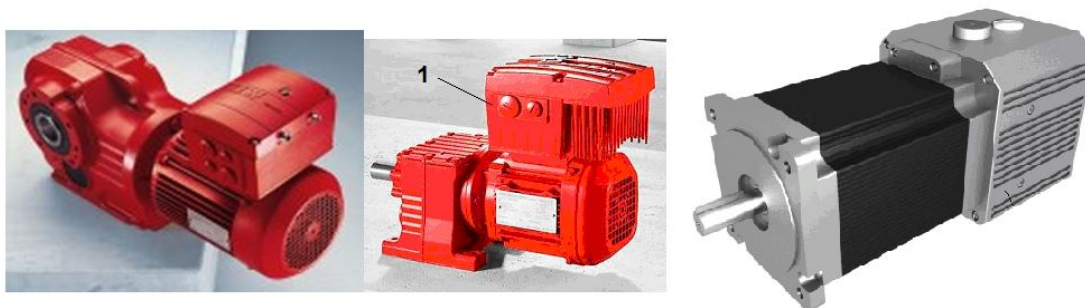


Рисунок 2.16 – Двигуни та мотор-редуктори з вбудованими перетворювачами частоти (1) [1]

Подібні пристрої завдяки наявності в складі обчислювальних пристроїв здатні автономно виконувати переміщення робочих органів машин без постійного контролю з боку системи автоматизації верхнього рівня.

Значне спрощення механічної частини електромехатронного модуля досягається шляхом використання лінійних двигунів замість звичайних двигунів обертального руху (рис. 2.17).

Лінійний двигун (ЛД) не має обертливих частин, що підкреслює його особливість. Рухомою частиною ЛД має обмотку, яка створює магнітне поле.



Рисунок 2.17 – Лінійний двигун і базові елементи [1]

Це магнітне поле відштовхується від нерухомої частини з постійними магнітами, яка відіграє роль напрямних, і забезпечує поступальне переміщення рухомої частини двигуна.

Для реалізації точних рухів електромехатронні модулі комплектуються датчиком положення (енкодером, рис. 2.18, а).

Електропривод, що обладнаний таким датчиком, називають сервоприводом.

До складу систем керування рухом, які об'єднують кілька сервоприводів входять сервоконтролери (рис. 2.18, б). До головних функцій сервоконтролерів належать координація рухів окремих сервоприводів

(модулів) і формування для них завдань на переміщення з метою реалізації складних просторових траєкторій руху.



Рисунок 2.18 – Зовнішній вигляд енкодерів (а) і сервоконтролерів (б) [1]

До основних переваг під час використання інтелектуальних електромехатронних елементів у електромеханічних комплексах зараховують:

- здатність виконувати складні рухи самостійно, без звернення до контролера верхнього рівня керування, що підвищує автономність модулів, гнучкість і живучість систем;
- спрощення комунікації між модулями та центральним пристроєм керування;
- підвищення надійності й безпеки електромехатронних систем завдяки комп'ютерній діагностиці пошкоджень автоматичного захисту під час аварійних ситуацій;
- створення на основі ІЕММ розподілених систем автоматизації, яким властиве делегування функцій управління «зверху»/«донизу», а також широке використання мережевих технологій під час обміну інформацією;
- використання інтелектуальних сенсорів в ІЕММ веде до підвищення точності вимірювань завдяки первинній обробці інформації, фільтрації шумів тощо.

Проектування та створення силової електроніки дає поштовх створенню інтелектуальних силових машин у сфері електромеханіки. Наприклад, такими перспективними представниками електромеханіки є магнітокомутаційні машини, які взаємно пов'язані з електромехатронними пристроями (ЕМПр).

Такого типу машини широко застосовуються в електроприводних системах, промисловій автоматичі і робототехніці, в сучасних транспортних системах, у медицині, в електромехатронних системах сучасних комп'ютерів, у суднових і авіаційних та інших.

Магнітокомутаційні машини (МКМ) становлять дискретні конструкції, які спільно з дискретними системами керування дозволяють створювати гнучкі ЕМП з інформаційними та енергетичними можливостями, недоступними для традиційних конструкцій.

Розглянемо особливості конструкції та принцип дії МКМ [15].

Елемент конструкції МКМ – є елементарний модуль (ЕМ), який складається з нерухомої частини (якір) і рухомої частини (ротор) (2.19).

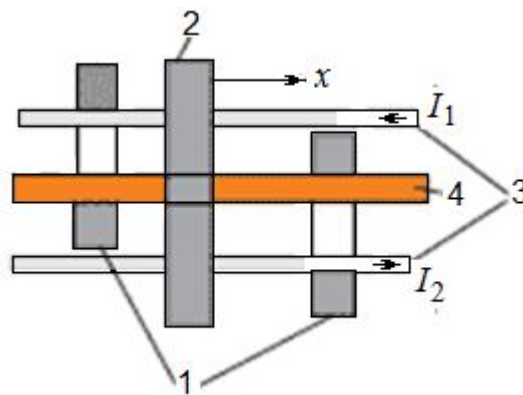


Рисунок 2.19 – Елементарний модуль магнітокомутаційної машини [15]:

1 – осердя якоря; 2 – ротор; 3 – обмотка збудження; 4 – обмотка якоря

На статорі (якорі – нерухомій частині) розташовані два П-подібних осердя (1) і дві обмотки збудження (3), окремі для кожного осердя. Постійні струми в обмотках збудження (I_1 , I_2) протікають у протилежних напрямках. Обмотка якоря (4) розташована також на нерухомій частині і проходить через обидва осердя.

На роторі (рухомої частини) розташована поздовжня частина осердя (2- полюс ротора), на який замикається магнітний потік.

Під час переміщення частини (2) в напрямку x спочатку замикається потік у лівому осерді, а потім у правому. Оскільки струми збудження мають протилежні напрямки, то магнітний потік, що охоплює обмотку якоря, змінює знак.

Під час живлення обмотки якоря змінним струмом на рухому частину машини буде діяти електромагнітний момент. Якщо частота струму в обмотці якоря дорівнює $f = pn/60$ (p – число пар полюсів), то момент на рухомій частині матиме постійне середнє значення. За принципом дії

МКМ є синхронною електричною машиною. Загальна конструкція магнітокомутаційної машини показана на рисунку 2.20.

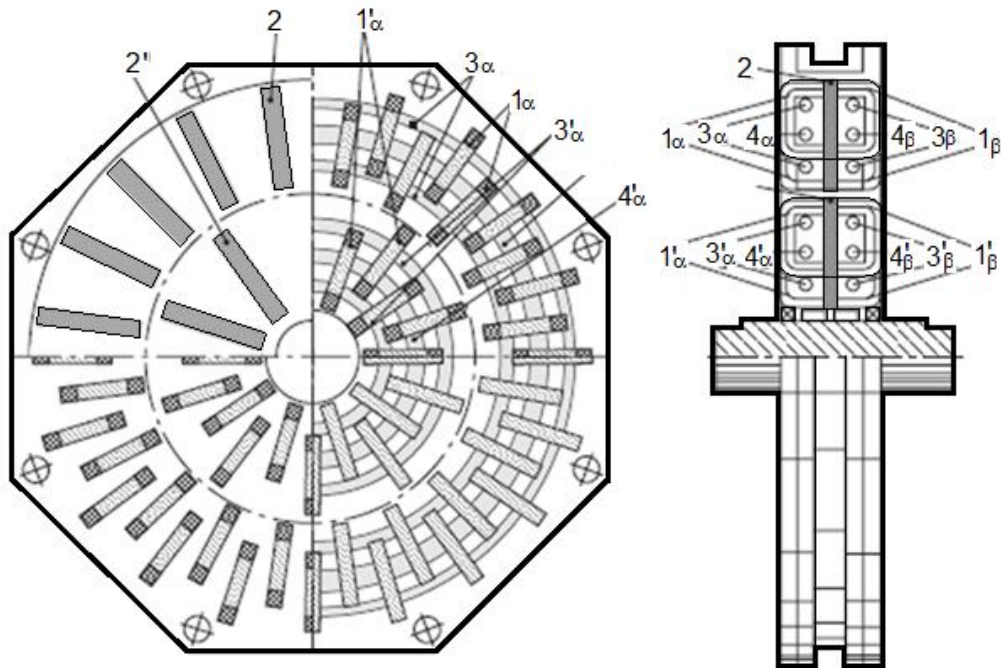


Рисунок 2.20 – Загальна конструкція магнітокомутаційної машини [15]

Магнітокомутаційна машина містить набір ЕМ, що утворюють кілька окремих МКМ. У цьому випадку МКМ має дві ЕМ, які зміщені в радіальному напрямку. Кожна МКМ має дві нерухомі електромагнітні системи (α і β), які зміщені на половину полюсного поділу (полюсний розподіл визначається розміщенням осердя статора). Уся конструкція МКМ містить П-подібні осердя (1α , $1'\alpha$; 1β , $1'\beta$), обмотки збудження (3α , $3'\alpha$; 3β , $3'\beta$) та обмотки якоря (4α , $4'\alpha$; 4β , $4'\beta$).

На обертовому диску ротора розташовані частини магнітопроводу (2 , $2'$), які замикають магнітний потік (полюса ротора). За збереження однакових конструктивних розмірів ЕМ, внутрішня МКМ містить меншу кількість полюсів. Ця особливість МКМ викликає необхідність керування кожною машиною від окремого перетворювача під час побудови електромехатронної системи. Характер розподілу магнітних полів, індуктивності і електрорушійної сили (ЕРС) у статорі МКМ подано на рисунку 2.21.

Коли феромагнітні частини (полюса) ротора замикають магнітні потоки в одній групі осердя статора, сумарний магнітний потік і індуктивність якорної обмотки набувають максимального значення.

У цей час в іншій групі магнітопроводів того саме статора, магнітні потоки мають мінімальні значення.

Водночас магнітний потік у другій групі, зчеплений з обмотками якоря ЕМ, має протилежний відносно першої групи магнітопроводів напрямок.

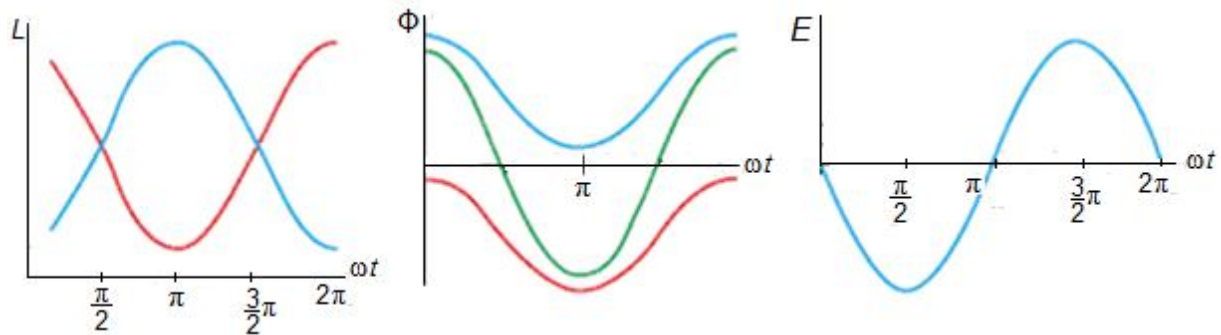


Рисунок 2.21 – Індуктивності, потоки і електрорушійна сила в магнітокомутаційній машині [15]

При повороті ротора на полюсний розподіл настає максимум магнітних потоків в другій групі, як показано на рисунку 2.21.

В окремій групі магнітопроводів під час переміщення ротора магнітний потік, спрямований по осі машини, періодично змінюється від максимального до мінімального значення, не змінюючи водночас свого знака в межах конкретної групи. У той же час в іншій групі магнітопроводів магнітний потік також не змінює свого напрямку, але зрушений по фазі в часі на 180 ел. градусів щодо магнітного потоку першої групи.

Таким чином, у загальній магнітній системі статора, що складається з двох груп, під час переміщення ротора виникає циркуляція двох змінних у часі магнітних потоків. Їхні максимальні значення зсунуті по фазі на період, π . Оскільки кожен із цих магнітних потоків, що періодично перемикаються, пронизує обмотку якоря, де індукується змінна в часі ЕРС.

Оскільки максимальний магнітний потік замикається через магнітопровід статора, феромагнітні елементи ротора і немагнітний робочий зазор, то залежність Φ_{max} від струму збудження аналогічна кривій намагнічування звичайних синхронних машин.

Для цієї конструкції (див.рис. 2.20) електромагнітні моменти двох МКМ складаються на одному валу. Електромагнітна модель МКМ подана на рисунку 2.22. Математичний опис кожної МКМ може бути подано в такому вигляді [15]:

$$u_{\alpha} = R_1 i_{\alpha} + \frac{d\psi_{\alpha}}{dt}, \quad u_{\beta} = R_1 i_{\beta} + \frac{d\psi_{\beta}}{dt}, \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_N, \quad (2.21)$$

де u_{α} u_{β} , – напруга живлення обмоток МКМ;

R_1 – опор системи МКМ, що знаходяться на одному валу;

i_α, i_β – струми збудження МКМ;

ψ_α, ψ_β – потокозчеплення МКМ по кожній з нерухомих осей (α, β, d, q);

J – момент інерції системи;

M_{em} – електромагнітний момент на валу МКМ;

M_N – номінальний момент на валу МКМ.

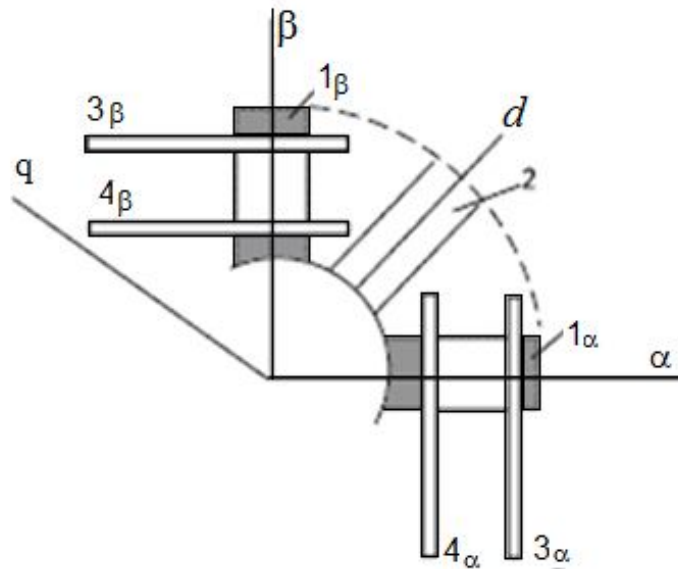


Рисунок 2.22 – Електромагнітна модель магнітокомутаційної машини [15]

У рівняннях (2.21) потокозчеплення (ψ_α, ψ_β) по кожній з нерухомих осей (α, β, d, q) і електромагнітний момент (M_{em}) на валу кожної МКМ знаходяться з виразів:

$$\begin{aligned} \psi_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_{0\alpha} = L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_0 \cos \theta, \\ \psi_\beta &= L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta} i_\beta + L_\beta i_\beta + \psi_0 \sin \theta, \\ M_{em} &= L_{\alpha\beta} (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_\alpha - L_\beta) \cdot i_\alpha i_\beta + \psi_{0\alpha} i_\beta - \psi_{0\beta} i_\alpha. \end{aligned} \quad (2.22)$$

де $L_\alpha, L_\beta, L_{\alpha\beta}$ – індуктивності та взаємно індуктивності в обмотках статора МКМ.

Якщо знехтувати насиченням сталі магнітопроводу, то вирази для власних індуктивностей і взаємної індуктивності мають вигляд:

$$\begin{aligned}
L_{\alpha} &= \frac{L_d - L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cdot \cos 2\theta, \\
L_{\beta} &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cdot \cos 2\theta, \\
L_{\alpha\beta} &= \frac{L_d - L_q}{2} \cdot \sin 2\theta.
\end{aligned} \tag{2.23}$$

$$\begin{aligned}
u_{\alpha} &= R_1 i_{\alpha} - (L_d - L_q) \cdot \omega \times \sin 2\theta \times i_{\alpha} + \left(\frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cdot \cos 2\theta \right) \cdot \frac{di_{\alpha}}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \cdot \omega \times \cos 2\theta \times i_{\beta} + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \times \frac{di_{\beta}}{dt} - \psi_0 \omega \sin \theta, \\
u_{\beta} &= R_1 i_{\beta} + (L_d - L_q) \cdot \omega \times \cos 2\theta \times i_{\alpha} + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \cdot \sin 2\theta \times \frac{di_{\alpha}}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \cdot \omega \times \sin 2\theta \times i_{\beta} + \left(\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cdot \cos 2\theta \right) \cdot \frac{di_{\beta}}{dt} + \psi_0 \omega \cos \theta, \\
M &= p \left[\frac{L_d - L_q}{2} \cdot \sin 2\theta \times (i_{\beta}^2 - i_{\alpha}^2) + (L_d - L_q) \cdot \cos 2\theta \times i_{\alpha} i_{\beta} + \psi_0 \cos \theta i_{\beta} - \psi \sin \theta i_{\alpha} \right]. \tag{2.24}
\end{aligned}$$

де p – число пар полюсів.

Повна оцінка МКМ у нерухомій системі координат запишеться у вигляді моменту інерції:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \Sigma M_{em} - M_N, \tag{2.25}$$

де ΣM – сумарний момент від двох МКМ.

Функціональна схема електромехатронного пристрою кожної МКМ показана на рисунку 2.23.

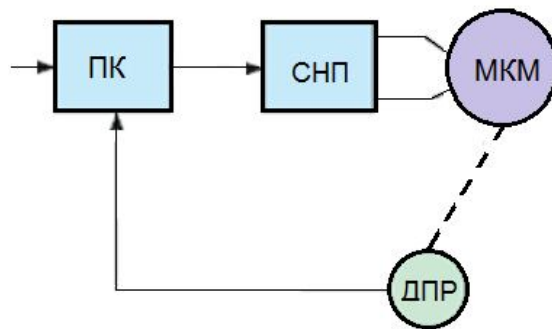


Рисунок 2.23 – Функціональна модель електромехатронного пристрою: ПК – перетворювач координат; СНП – силовий напівпровідниковий перетворювач; МКМ – магнітокомутаційна машина; ДПР – датчик положення ротора [15]

Керування МКМ відбувається від СНП, який, зі свого боку, керується від датчика положення ротора (ДПР) і перетворювача координат (ПК). За такої побудови напруги живлення обмоток u_α і u_β залежать як від положення ротора машини, так і від алгоритму роботи СНП. Ці дві обставини необхідно враховувати під час побудови моделі ЕМПр.

Силовий перетворювач виконується за схемою двоплечевого (мостового) однофазного інвертора, який керується від широтно-імпульсного модулятора (ШІМ).

Таким чином, на виході СНП реалізована синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція з амплітудою, що дорівнює напрузі живлення СНП.

ДПР і ПК реалізовані на обертовому трансформаторі (ОТ), балансному модуляторі (М), двох фазочутливих випрямлячах (ФЧВ), генераторі частоти (Г) і двох фільтрах низької частоти (Ф). Функціональна схема цих блоків показана на рисунку 2.24.

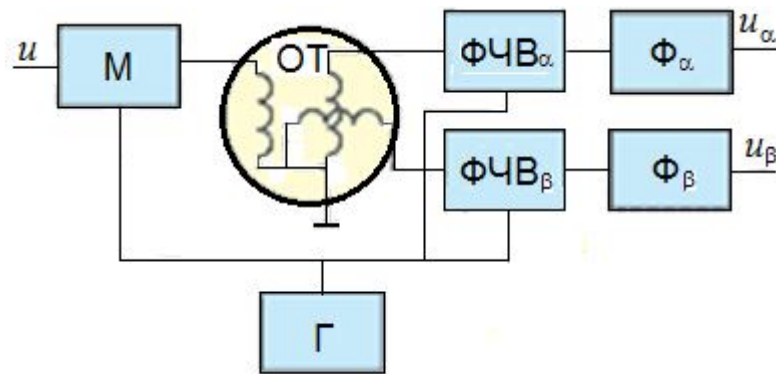


Рисунок 2.24 – Функціональна схема датчика положення ротора і перетворювача координат: М – балансний модулятор; ОТ – обертовий трансформатор; ФЧВ – фазочутливий випрямляч; Г – генератор частоти; Ф – фільтр низької частоти; u – сигнал керування; u_α, u_β – сигнали, що надходять на ШІМ [15]

На вхід схеми подається сигнал керування u , а з виходу схеми знімаються два сигнали u_α, u_β , що надходять на входи відповідних ШІМ.

Нові технології в конструюванні МКМ підвищують роботу елементів. Наприклад, одним із простих рішень є використання на статорі ще однієї МКМ, розташованої поблизу осі з малими конструктивними розмірами осердя. На якірні обмотки такий МКМ подається сигнал із виходу модулятора, а сигнали на ФЧВ знімаються з обмоток збудження.

При використанні в ЕМПр релейних регуляторів (РРТ) як генератори отримується функціональна схема регулювання, що подана на рисунку 2.25.

Вони керують чотирма СНП, які, зі свого боку, живлять чотири якірних обмотки МКМ. Регулятор швидкості (РШ) є загальним, а на його вхід подаються сигнал управління і сигнал зворотного зв'язку з обчислювача швидкості (ОШ).

В цьому випадку ЕМП є джерелом моменту і його швидкість наростає лінійно, про що свідчить зростання частоти струмів в обмотках якоря МКМ.

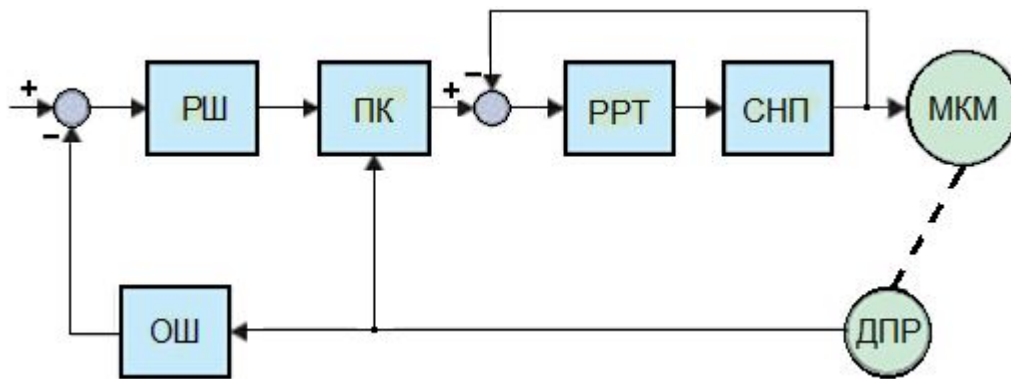


Рисунок 2.25 – Функціональна схема системи регулювання:

РШ – регулятор швидкості; ПК – перетворювач координат;
РРТ – релейний регулятор; СНП – силовий напівпровідниковий перетворювач;
МКМ – магнітокомутаційна машина; ДПР – датчик положення ротора;
ОШ – обчислювач швидкості [15]

Завдання синтезу параметрів регулятора для нелінійної системи може бути вирішена з використанням пакета прикладних програм Simulink Response Optimization. Цей прикладний пакет Simulink реалізує метод динамічної оптимізації при заданих обмеженнях [15].

У МКМ раціонально використовуються електричні та магнітні матеріали, відсутнє перемагнічування і пов'язані з ним втрати в магнітних контурах унаслідок односпрямованих магнітних потоків збудження.

Скорочення довжини силових ліній магнітного поля покращує використання обсягу електромагнітного ядра і зменшує масу, електротехнічної сталі, що витрачається. Це також веде до зниження додаткових втрат на вихрові струми і гістерезис і таким чином сприяє збільшенню ККД машини.

Особливості конструкцій МКМ відкривають широкі можливості для оптимального проектування та синтезу необхідних параметрів і заданих розробником характеристик ЕМПр.

Отже, створення унікальних перспективних конструкцій електромехатронних модулів і систем сприяє розвитку та підвищенню

експлуатаційних характеристик їхньої роботи. Використання електромеханічних систем автоматизованого електроприводу сприяє створенню сучасних елементів ЕМК, які мають необхідні характеристики та пристрої регулювання.

2.7 Інтелектуальні транспортні системи і технології в інфраструктурі міст

Розвиток інфраструктури великих міст не існує без використання міського електротранспорту, який є однією з найважливіших складових економіки міста і держави загалом. Транспортна інфраструктура міста – це величезний комплекс служб та об'єктів, яка складається з елементів інтелектуальних електромехатронних систем. Вони забезпечують швидке і вільне перевезення пасажирів і вантажів, а також визначають головні складові, що акумулюють всю ключову інформацію та приймають більшість стратегічних, тактичних і оперативних рішень під час керування дорожньо-транспортним комплексом.

Тому інтеграція різних автоматизованих і інтелектуальних систем на транспорті виправдана і заслуговує підвищеної уваги.

У результаті на піку розвитку різних галузевих і локальних автоматизованих систем управління та інформаційних технологій на транспорті створюються інтелектуальні системи, що мають єдиний управлінський технічно-програмний комплекс міст України (рис. 2.26).

Інтелектуальна транспортна система (ІТС) – це системна інтеграція сучасних інформаційних і комунікаційних технологій і засобів автоматизації з транспортною інфраструктурою. До складу такої системи входять безліч електромехатронних елементів та модулів, які впливають на процеси керування транспортними засобами і користувачами, визначення інформації та інші процеси [16–18].

Загалом термін ІТС як назва класу систем у транспортній галузі та ідея напрямків розвитку управлінського комплексу за останні роки пройшов певний шлях становлення, інтересу, гіперпопулярності та спаду.

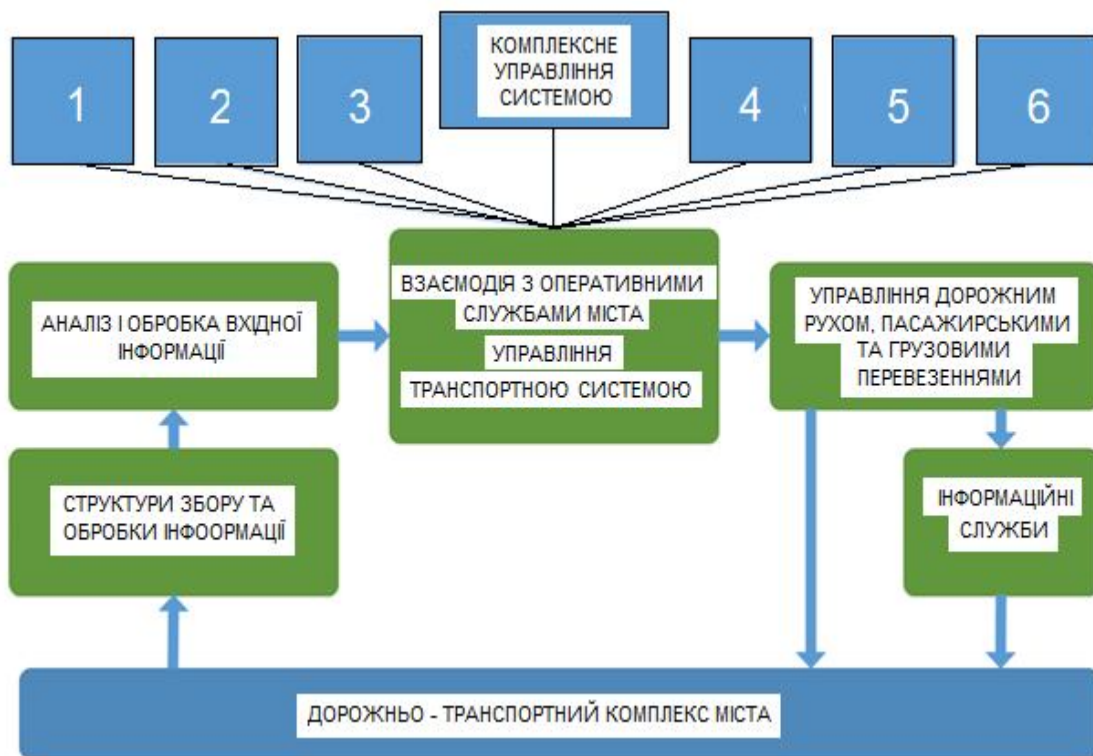


Рисунок 2.26 – Загальна схема процесів інтелектуальної транспортної системи: 1 – диспетчерські служби; 2 – дежурні частини МВД; 3 – структурні частини служб; 4 – дежурні частини цивільної оборони та надзвичайних ситуацій і швидкої допомоги; 5 – дежурні служби наземного та підземного транспорту; 6 – дежурні служби експлуатації доріг та комунального господарства

Використання інтелектуальних елементів ЕМК на транспорті легко перепрограмуються під нове завдання, що розширює його функціональні можливості.

Разом із розвитком техніки вузли елементів ЕМК мають різне фізичне походження (механічні, електричні, електромеханічні, електронні, інформаційні). Проте це не заважає їм поступово об'єднуватися в єдине конструктивне коло (рис. 2.27).

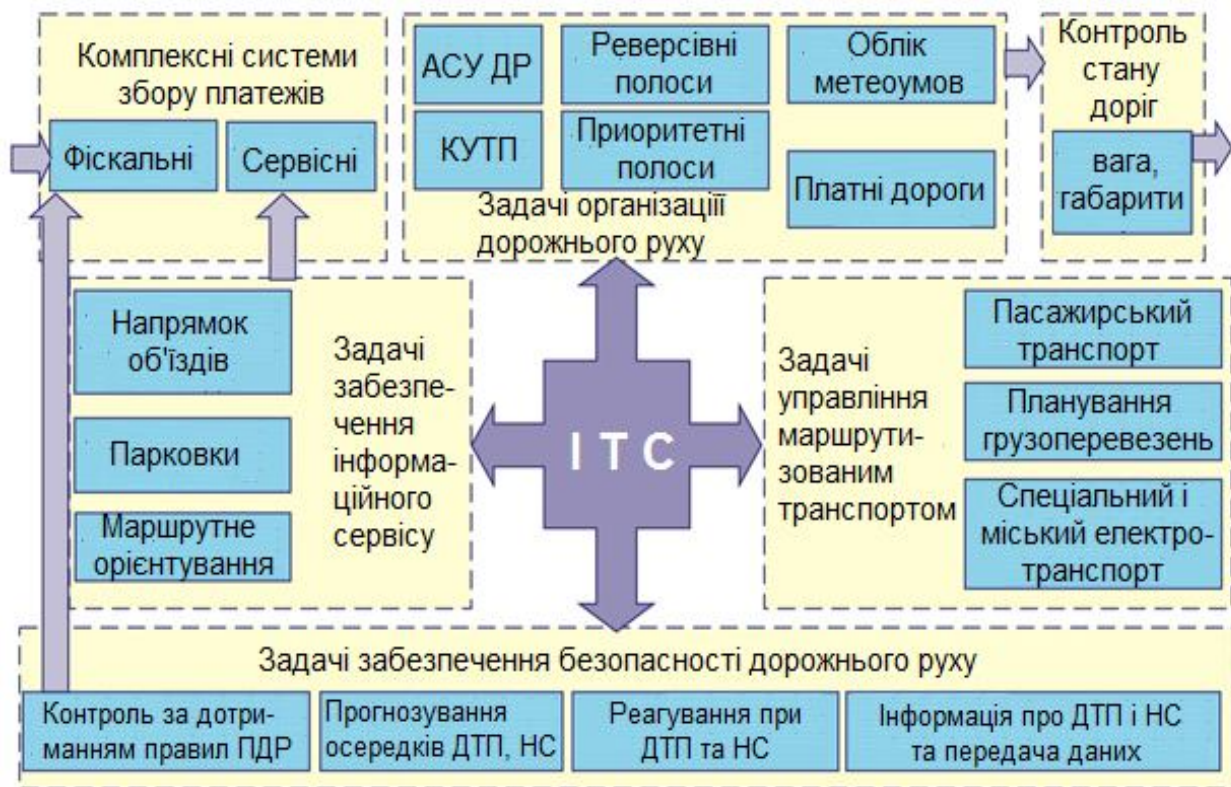


Рисунок 2.27 – Загальна інтелектуальна структура транспортної системи міста

Під час розроблення стандартів ІТС важливим є визначення належності можливої інтеграції великої низки транспортних систем і компонент, за яких результуюча система, що експлуатується, об'єднана одним господарюючим суб'єктом.

До компонент транспортних систем належать:

1. Системи збору інформації про умови руху та стан дорожньо-транспортного комплексу:

- мережі детекторів транспорту;
- системи збору інформації на підставі телемеханічних даних;
- мережі відеокамер спостереження;
- спеціальні заходи з обстеження умов руху і аварійних ситуацій міста;

- шлюзи в зовнішні суміжні системи;
- пасажирські перевізники;
- оператори систем продажу квитків;
- різні відомчі системи, що акумулюють інформацію про позаштатні і надзвичайні ситуації у місті.

2. Системи моделювання (моделі транспортних, вантажних, пасажирських потоків).

3. Системи керування дорожнім рухом.

4. Системи забезпечення безпеки на транспорті, зокрема відеоспостереження на ділянках дороги, у салонах транспортних засобів.
5. Системи керування паркувальним простором.
6. Системи моніторингу руху (по підприємствах, по категоріях).
7. Системи керування маршрутним транспортом.
8. Системи керування логістикою.
9. Системи контролю стану дорожнього господарства та керування дорожнім господарством і станом доріг.
10. Системи інформування учасників руху.
11. Системи інформування пасажирів.
12. Системи контролю платності проїзду.
13. Системи забезпечення (технічні, інформаційні, зв'язкові тощо).
14. Геоінформаційні системи регіону.
15. Аналітичний керуючий (ситуаційний) центр.

Виходячи зі специфіки діяльності органів державної влади та управління, центри інтеграції та аналітичної обробки інформації здійснюють в інтересах цієї групи споживачів збору, обробки і узагальнення інформації за напрямками:

- транспортна мережа (стан транспортної мережі; номінальна, реальна і пікова пропускна здатність; прохідність доріг для служб екстреного виклику; доступність для населення основних соціальних служб);
- транспортний трафік (склад, основні суб'єкти та складові вантажо- і пасажиропотоку; циклічні і аперіодичні пульсації трафіку; приховані залежності між графіком функціонування вантажоодержувачів, вантажовідправників, перевізників та пульсаціями трафіку);
- «транспортна компонента» соціальної та екологічної обстановки (ступінь задоволення потреб населення в транспортному обслуговуванні; стан безпеки перевезень; екологічне навантаження);
- економічна характеристика (діючі тарифи та цінова політика перевізників; зумовлені специфікою розвитку транспортної інфраструктури депресивні зони);
- критичні вантажі (місце перебування, стан і маршрути переміщення) і інші.

Таким чином, використання ІТС дозволить органам територіального самоврядування планувати створення елементів соціальної інфраструктури, надавати послуги з вибору місць оптимального розміщення об'єктів торгівлі, рекреаційних зон, своєчасно здійснювати обслуговування транспортних мереж, брати участь у плануванні розвитку шляхових мереж

з урахуванням потреб населення та суб'єктів економічної діяльності, обґрунтовано виділяти бюджетні кошти, визначати компенсацію екологічних ризиків.

2.8 Електромехатронні системи і комплекси керування міським електротранспортом

У структурі ІТС значне місце займає автоматизована система наземного міського електротранспорту, яка є складним комплексом з інтегральними функціями керування (рис. 2.28) та має безліч електромехатронних систем і комплексів, що виконують різні функції.



Рисунок 2.28 – Автоматизована система керування міського електротранспорту

До основних функцій автоматизованої системи належать:

- діагностика і запобігання аварійним ситуаціям;
- складання графіків профілактичних ремонтів і облік часу простою технологічного обладнання;
- автоматизований облік за витратою електроенергії на кожній лінії, що живиться від енергосистеми й об'єктивний аналіз втрат;
- утримання обсягу оперативної пам'яті, необхідність її миттєвої обробки для видачі керуючих впливів.

Керування роботою міського електротранспорту проводиться з центрального диспетчерського пункту (ЦДП). Система ЦДП обладнана автоматизованими засобами передачі, збору, обробки, відображення та зберігання інформації. Зв'язок із підрозділами здійснюється також за телефоном і радіостанцією.

У сферу діяльності ЦДП входить:

- координація робіт ремонтного й оперативного персоналу, бригад ремонту та обслуговування контактної і кабельної мережі;

- керування і керівництво роботами з ліквідації аварійних ситуацій, а також ненормальних режимів роботи обладнання;
- зв'язок із енергопостачальними організаціями, центральним диспетчером, службою головного ревізора;
- оперативне керування підрозділами енергослужб.

В основу побудови будь-якої автоматизованої системи керування міського електротранспорту (АСК МЕТ) покладено ієрархічний принцип, який полягає в тому, що вся система розбивається на окремі підсистеми або рівні керування (рис. 2.29).

Така структура сприяє створенню комплексу зовнішніх і внутрішніх технічних засобів і систем телемеханіки, у які входять системи збору, передачі, обробки, відображення, зберігання інформації, а також модернізація периферійного обладнання контактної-кабельної мережі і тягових підстанцій (ТП).

Застосування такого принципу побудови структури міського електротранспорту (МЕТ) обумовлено необхідністю:

- наявності диспетчерського керування на всіх рівнях;
- розподілу функцій диспетчерів систем керування та електропостачання;
- диференціювання інформації щодо конкретної ситуації.

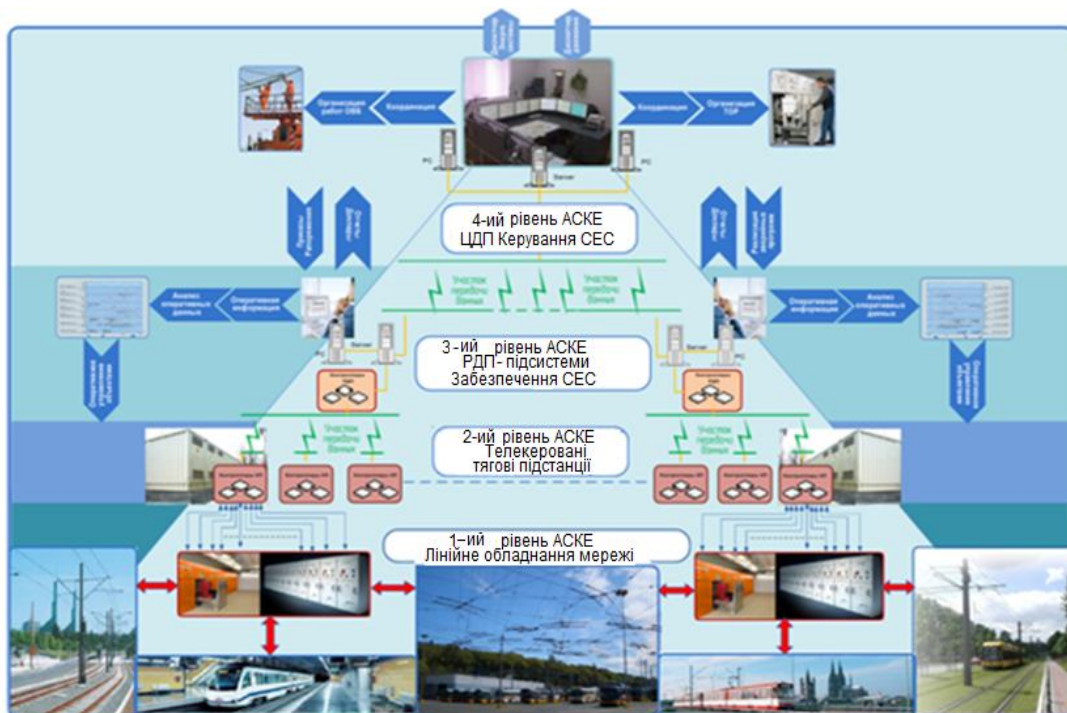


Рисунок 2.29 – Автоматизована система регулювання роботою міського електричного транспорту

Сучасні автоматизовані системи МЕТ оснащені елементами контактної кабельної мережі з виконавчими пристроями, а також пристроями збору і передачі інформації.

На *першому рівні* автоматизованої системи передбачено отримання інформації про:

- наявність напруги на ділянках секціонування контактної мережі;
- стан контактного проводу (механічний натяг на анкерних ділянках, знос, допустима температура нагріву і тощо);
- керування лінійними та кабельними роз'єднувачами.

На *другому рівні* автоматизованої системи на додаток до існуючих функцій також передбачено:

- дистанційне керування командною і сигнальною апаратурою секційних та лінійних роз'єднувачів;
- збір інформації від лічильників активної та реактивної енергії за кількома тарифами, її первинна обробка і зберігання;
- збір інформації від датчиків телевимірювання поточних значень навантаження по лінії живлення і випрямних агрегатів;
- збір інформації з контрольованих пунктів (КП) з метою отримання деяких розрахункових функцій і вироблення керуючих впливів на технологічне обладнання. Це підвищує надійність системи загалом, особливо в аварійних ситуаціях.

Третій рівень автоматизованої системи обладнаний пристроями телемеханіки та обчислювальної техніки і конфігурує залежно від покладених завдань і обсягу інформації, що обробляється. Принцип дії телемеханічної системи подано на рисунку 2.30.

На цьому рівні виконуються такі завдання:

- керування функціональними і лінійними об'єктами ТП за допомогою засобів телекерування;
- отримання інформації про несправності периферійного обладнання та його режими роботи;
- відтворення і відображення інформації;
- обробка інформації, її диференціювання і здійснення передачі на більш високий рівень;
- виконання службових команд з більш високих рівнів;
- отримання інформації за викликом і в аварійних ситуаціях;
- ретрансляція інтегральних і поточних значень телевимірювання на більш високий рівень.

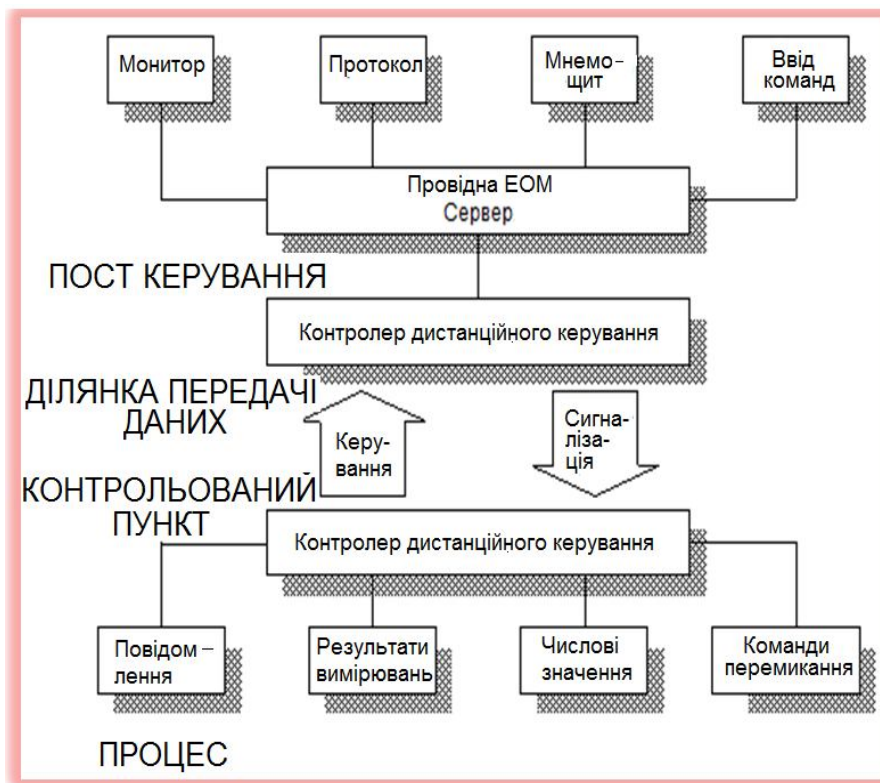


Рисунок 2.30 – Принцип дії телемеханічної системи

Четвертий рівень автоматизованої системи МЕТ обладнаний пристроями телемеханіки та обчислювальної техніки для збору, обробки та зберігання інформації, яка надходить від районного диспетчерського пункту на ЦДП, де передбачено:

- збір інформації, що надходить з нижніх рівнів про роботу автоматизованої системи загалом, її обробка та зберігання;
- координація роботи окремих підсистем оперативного керування;
- керування аварійним режимом для прискорення відновлення живлення контактної мережі;
- керування та контроль за ремонтно-профілактичним обслуговуванням устаткування;
- централізований облік (споживання електроенергії; облік часу простоїв і перерв МЕТ; планування оглядів і ремонтів технологічного обладнання; температури нагріву контактного проводу; зв'язок з іншими автоматизованими системами керування і тощо).

На більш високих рівнях керування автоматизованої системи МЕТ завдяки пристроям обробки телемеханічної інформації виконуються такі функції:

- прийом повідомлень телесигналізації (ТС), телевимірювання (ТВ), виробничо-статистичної інформації (BCI);
- проводиться програмне і спорадичне опитування параметрів систем.

Уся інформація, яка надходить від периферійних пристроїв телемеханіки на ЦДП, заноситься в бази даних і зберігається у вигляді архівів із обов'язковим резервним копіюванням.

Таким чином, автоматизована система керування МЕТ призначена для безперервного автоматичного контролю і діагностування роботи технологічного устаткування, пристроїв ТП, технологічних процесів електропостачання ліній МЕТ.

У мегаполісах України та інших країн світу значне місце займає метрополітен, який також належить до системи міського електротранспорту.

Для вимог роботи сучасного метрополітену характерно використання комплексних ЕМС, які пов'язані з програмним забезпеченням роботи устаткування. Такий вид автоматизованого керування розділений на дві системи:

- комплексна система організації руху потягів на лінії метрополітену, що звільняє машиністів від одноманітних, часто повторюваних при управлінні операцій;
- комплексна автоматизована система диспетчерського керування (КАСДК), яка вирішує завдання керування пристроями життєзабезпечення.

Сучасна автоматизована *система організації руху потягів* (рис. 2.31), пов'язана з системою диспетчерського керування та диспетчерської централізації.

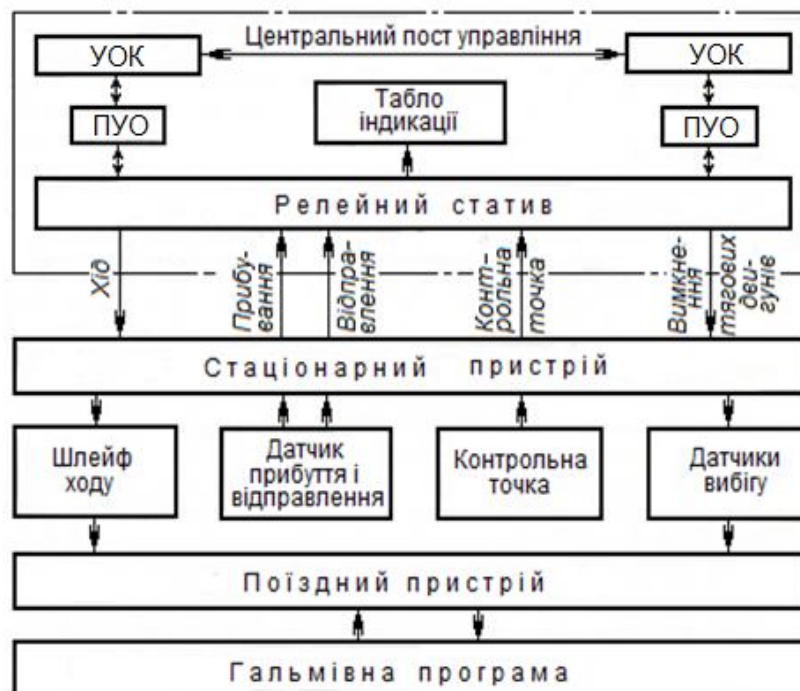


Рисунок 2.31 – Структурна схема комплексної системи автоматизованого керування рухом потягів [19]

На центральний пост управління (ЦПУ) надходять сигнали про рух всіх потягів на лінії. Потім відбувається вироблення команд управління на відправлення їх зі станцій і керування часом ходу по перегону [19, 20].

ЦПУ побудований на базі двох управляючих обчислювальних комплексів (УОК). Один УОК працює в режимі управління, інший перебуває в резерві. ЦПУ через пристрої узгодження з об'єктом (ПУО) і релейний статив з'єднаний кабельними лініями зв'язку з кожним станційним пристроєм.

При вході потяга на станцію (з релейної шафи системи інтервального регулювання) сигнал з датчика прибуття через станційний пристрій передається на ЦПУ. На основі інформації про планове значення графіку і сигналів фактичного прибуття потяга виробляється команда за 5 с до моменту програмного відправлення потяга зі станції. Така ж інформація передається через шлейф ходу на потяг по кабельних лініях зв'язку.

Пристрій потягу за сигналом «хід» здійснює звукове сповіщення машиністу, шляхом увімкнення радіоінформатора. Далі відбувається відпускання гальм після закриття дверей і відправлення потяга. За сигналом про проходження потягом контрольної точки (індуктивного датчика), встановленої на початку зони вимкнення тягового електродвигуна (ТЕД), обчислюється час, що залишився у ходу від моменту фактичного відправлення потяга (визначається за сигналом датчика відправлення) до моменту прибуття його на наступну станцію по графіку.

Станційні пристрої виконують роль ретрансляторів команд і сигналів між поїзним пристроєм і ЦПУ. Наприклад, на інформаційному табло, висвічуються всі сигнали про прибуття та відправлення потяга зі станції, а також проходження контрольних точок і виробляються команди на відправлення потягів і виключення ТЕД.

Автоматизована система управління потягами складається з двох підсистем: безпеки руху, яка має пристрої автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) і автоматичної регулювальної системи (АРС), а також системи автоведення потягів.

Автоматизована система АРС визначає допустиму швидкість потяга, що йде залежно від місця його розташування попереду, і постійних обмежень швидкості. У разі перевищення допустимої швидкості потягом здійснюється перехід на увімкнення гальм. Після зниження швидкості здійснюється перехід на режим вибігу.

Для інтервального регулювання і забезпечення безпеки руху застосовується однобічне автоматичне блокування. Дія автоблокування засноване на огороженні блок-ділянок світлофорами. Показання світлофорів поставлені в залежність від стану блок-ділянок та переключаються

автоматично після появи на них потяга. Контроль вільності або зайнятості блок-ділянок потягом здійснюється за допомогою електричних рейкових ланцюгів.

В автоматизованій системі передбачено (залежно від довжини шляху, вільного для руху) п'ять ступенів допустимої швидкості: 0, 40, 60, 70 і 80 км / год. У разі припинення надходження зі шляху кодових сигналів рух потягу може здійснюватися зі швидкістю не більше 20 км / год при натиснутій машиністом кнопці пильності.

Максимальне зближення потягу з перешкодою можливо на відстані гальмівного шляху за допустимої швидкості руху. Зміна ступеня допустимої швидкості в міру зближення потягу з перешкодою дозволяє вибрати найбільш раціональний режим його руху. Пропускна здатність лінії метрополітену при оснащенні її автоматичними пристроями АЛС-АРС збільшується порівняно з лінією, обладнаною автоблокуванням, на 20–25 % і досягає 45–48 пар потягів на годину. Завдяки безперервному контролю фактичної швидкості і обмеження її в межах допустимої автоматична система АЛС-АРС забезпечує високий ступінь безпеки руху потягів.

Система автоматичної локомотивної сигналізації з автоматичним регулюванням швидкості (АЛС-АРШ) складається з подорожніх і поїзних пристроїв. Потяги централізовано управляються за допомогою комплексу пристроїв: центрального пункту управління, станційних, колійних та поїзних.

Колійні пристрої за допомогою рейкових ланцюгів визначають вільність колії, формують кодові сигнали про допустиму швидкість руху і передають їх по рейкової лінії на потяг.

Основу колійних пристроїв складають рейкові кола, за допомогою яких перевіряється стан шляху, визначається кількість блок-ділянок, вільних для руху. Рейкове коло слугує також каналом зв'язку для передачі на поїзд інформації про допустиму швидкість руху. Таким чином, в автоматизованій системі АЛС-АРС по рейковому колу одночасно протікають два сигнальних струми:

- струм частотою 50 Гц, що забезпечує роботу колійних реле;
- струм кодових сигналів автоматичної системи АЛС-АРШ, призначений для передачі інформації на поїзні пристрої.

Принцип побудови сигналів АЛС-АРШ є частотно-кодовим. Кожній частоті відповідає певна допустима швидкість руху. Наприклад, частоті 75 Гц відповідає допустима швидкість 80 км/г; частоті 125 Гц – 70 км/г; частоті 175 Гц – 60 км/г; частоті 225 Гц – 40 км/г і частоті 275 Гц – 0 км/г.

Вибір діапазону частот зроблений з умови надійного фільтрування кодових сигналів автоматичною системою АЛС-АРШ від гармонійних складових тягового струму, кратних току промислової частоти 50 Гц.

Для перетворення струму з частотою 50 Гц у струм сигнальної частоти 75-275 Гц застосовується спеціальний генератор. Кодові сигнали автоматичної системи АЛС-АРС формуються за допомогою керуючих реле, якими контролюється наявність гальмівного шляху за кодовою ділянкою.

Поїзні пристрої автоматичної системи АЛС-АРШ призначені для прийому і обробки команд, що надходять із ЦПУ і реалізації прицільного гальмування. Прицільне гальмування у платформи здійснюється за програмами пасивних датчиків, встановлених у зоні гальмування.

Поїзні пристрої безперервно вимірюють фактичну швидкість потяга і порівнюють її з допустимою. Якщо фактична швидкість не перевищує допустимого значення, то поїзні пристрої не впливають на процес управління потягом. У разі перевищення допустимої швидкості пристроєм системи АЛС-АРШ автоматично вмикають гальмування. Після зниження швидкості до допустимого значення гальмування поїзда автоматично вимикається. Поїзні пристрої складаються з (рис. 2.32):

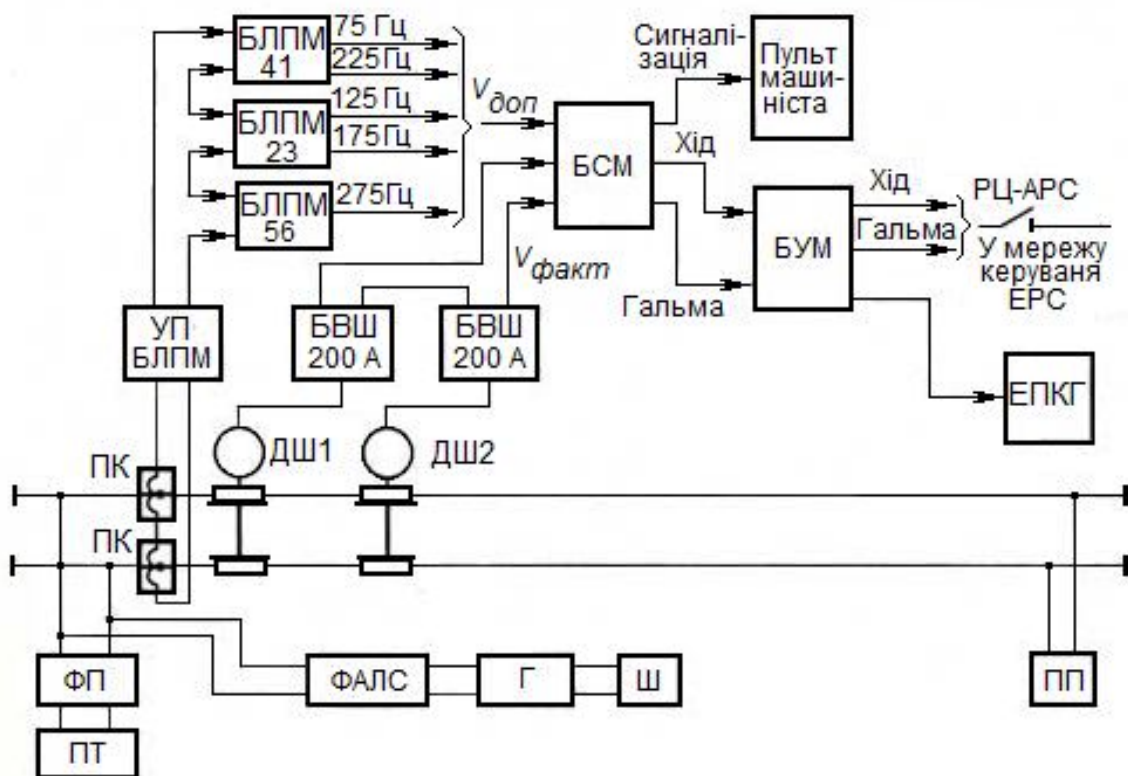


Рисунок 2.32 – Функціональна схема поїзних пристроїв автоматизованої системи АЛС-АРШ [19]

– прийомних котушок (ПК), що призначені для прийому кодового сигналу з рейкової лінії і встановлюються перед першою колісною парою потягу над кожною ходовою рейкою;

– датчиків швидкості (ДШ), які призначені для вимірювання фактичної швидкості потягу. Під час обертання потягу датчик генерує електричні сигнали з частотою прямо пропорційною швидкості руху потягу. На осі кожної колісної пари КП першого візка головного вагону встановлюється по одному датчику ДШ1. Застосування двох датчиків виключає формування помилкового сигналу під час руху потягу з заклиненою колісною парою;

– блоків локомотивних приймачів (БЛПМ), що призначені для прийому, дешифрування і посилення струму сигнальної частоти, яка сприймається ПК, та містить два селективних приймача. Кожен приймач налаштований на прийом тільки однієї певної сигнальної частоти;

– блоків вимірювання швидкості, які призначені для визначення фактичної швидкості руху потягу. Вони працюють спільно з датчиком швидкості ДШ-1 і складаються з підсилювача, фільтрів і швидкісних реле;

– блока сигналізації машиніста (БСМ), що призначений для порівняння фактичної і припустимої швидкості і формування команд на гальмування або дозвіл руху, а також для управління сигналізацією на пульті машиніста;

– блока управління (БУМ), який призначений для видачі команд, сформованих блоком БСМ, у ланцюзі управління потягом. За фактичної швидкості менше допустимої він дозволяє рух у режимі, який визначається машиністом потягу. У разі перевищення допустимої швидкості видається автоматично команда на гальмування з попередніми відімкненнями ТЕД і сигналізацією;

– узгоджувального пристрою (УП-БЛПМ), що призначений для узгодження електричних характеристик БЛПМ і ПК;

– реле контролю гальмівного струму (РДГС, на рис. 2.32 не показано), яке призначене для контролю величини гальмівного струму кожного вагона під час електричного гальмування від автоматичних пристроїв АЛС-АРС;

– датчика контролю пневматичного гальма (ДКПГ, на рис. 2.32 не показано), який контролює дію пневматичного гальма в разі відмови або не ефективності його роботи;

– електропневматичного клапана екстреного гальмування (ЕПКГ), що призначений для екстреного гальмування шляхом розрядження гальмівної магістралі.

Уся апаратура поїзних пристроїв АЛС-АРШ виготовлена в блочному виконанні і встановлена в окремому стативі.

Впровадження систем автоведення потягів метрополітену (САВПМ) дозволяє знизити витрату електроенергії на 5–10 % завдяки підвищенню точності виконання графіка руху, скорочення зайвих гальмувань потягів, застосування раціональних режимів ведення потягів та зменшення часу на прицільне гальмування у платформ. Застосування САВПМ полегшує працю

машиніста, звільняє його від функцій безпосереднього управління потягом, скорочує час на перевезення пасажирів.

Системи автоведення поїздів автоматизують процеси пуску і розгону, вибирають режими ведення потяга по перегону з метою виконання заданого часу ходу, забезпечують пригальмовування на вимогу постійних обмежень швидкості, прицільне гальмування у платформ, відкриття і закриття дверей, увімкнення радіосповіщення тощо.

Застосування сучасних мікропроцесорних пристроїв автоведення потягів метрополітену дозволяє розширити функції автоматизованої системи без збільшення апаратури, підвищити якість управління, прискорити процес впровадження шляхом застосування спеціальних програм, удосконалювати алгоритм управління під час експлуатації без апаратурних переробок шляхом зміни програмного забезпечення, підвищити надійність роботи системи.

Автоматичні пристрої здійснюють також функціональний контроль за роботою обладнання, його справністю, фактичне виконання заданого графіка руху. Ця інформація передається в центр управління для прийняття рішення про подальший порядок руху або вилучення вагона з потягу для усунення пошкоджень.

Постійне, автоматичне порівняння запрограмованої і фактичної ситуацій руху здійснюється з використанням обчислювальної та цифрової техніки, яка приймає рішення і передає на потяг вимоги про зміну того чи іншого параметра руху.

Для кожної станції запрограмований час стоянки поїзда на платформі. Він може змінюватися в залежності від часу доби і пори року. У звичайних умовах двері вагонів закриваються автоматично після закінчення часу стоянки. Диспетчер натискає кнопку відправлення в центрі управління, потяг відправляється автоматично.

У незвичайних умовах, наприклад, у разі збільшенні пасажиропотоку і часу стоянки, у диспетчера є можливість вимкнути автоматичні пристрої і безпосередньо керувати рухом потягів.

Одним із важливих елементів системи повної автоматизації є діагностика несправностей та контроль за технічним станом ЕРС. Інформація про технічний стан вагонів постійно надходить у центр управління по індуктивному кабелю. Таким чином, про будь-які несправності відразу стає відомо черговому персоналу в центрі управління, де вирішується питання про зняття несправного ЕРПр із маршруту. Передбачається, що в майбутньому причини несправностей будуть визначатися автоматично поїзними пристроями й будуть усуватися без зняття складу з маршруту. Усе необхідне для цього буде встановлено на кожному вагоні. Таким чином з'явиться можливість усунення пошкоджень без зупинки руху ЕРПр.

Техніка метрополітенів безперервно удосконалюється. З метою підвищення пропускної та провізної здатності ліній поліпшуються характеристики потягів, обладнання та пристроїв, впроваджуються прогресивні способи експлуатації. Найбільший ефект при цьому досягається завдяки застосуванню засобів автоматики і телемеханіки.

Інформація про рух усіх потягів, їхній технічний стан, а також про стан устаткування, встановленого на станціях і перегонах, передається в ЦДУ по дубльованому волоконно-оптичному зв'язку і відображається на табло диспетчерського пункту (рис. 2.33, рис. 2.34).

Обробка інформації, що надходить у ЦДК, здійснюється за допомогою двох спеціалізованих обчислювальних комплексів, що входять до складу автоматизованої системи. Кожен із цих комплексів має двократне резервування і побудований на базі серверів IBM X Series.

Для забезпечення безпеки руху й автоматизованого керування рухом пасажирських і господарських потягів на ділянках ліній метрополітену використовується станційне керування.



Рисунок 2.33 – Центральний диспетчерський пункт керування метрополітеном



Рисунок 2.34 – Автоматизоване робоче місце чергового диспетчера

Автоматизоване керування забезпечує:

- трансляцію команд ЦДП або місцеве керування стрілками і сигналами;
- керування маршрутами;
- візуальний контроль за обстановкою поїздок;
- діагностику стану устаткування, протоколювання робіт операторів автоматизованої системи.

Стационарна цифрова обчислювальна система (СЦОС), що складається з трьох стаціонарних обчислювальних машин, забезпечує безпеку роботи системи в умовах однієї відмови або потоку відмов (збоїв), що перемежаються. Функції, які забезпечує система СЦОС:

- контроль стану рейкових ланцюгів («ланцюг вільний», «ланцюг зайнятий», «контроль цілісності»);

– розрахунок допустимої швидкості V_d з урахуванням обстановки потягу на перегоні, технічного стану перегону, встановлених маршрутів і режимів руху;

– передачу по каналу з двократною фазо-різністною модуляцією в апаратуру потягу поточних значень V_d для цієї і наступної ділянок шляху;

– видачу $V_d = 0$ для гальмування потягу до повної зупинки перед зайнятою ділянкою шляху або перед ділянкою з порушеною цілісністю рейкового ланцюга;

– завдання і відміну маршруту та автоматичного режиму з повною перевіркою умов безпеки, а також виконання додаткових функцій, видачу необхідної оперативної інформації і тощо;

– перевірку умов безпеки переведення стрілок і керування їхніми положенням;

– керування вогнями світлофорів, ув'язка з суміжними системами;

– прийом команд централізованого керування рухом потягів по лінії, що поступають від ЦДП, а також контроль виконання цих команд;

– прийом і передачу інформації про номер маршруту, номер потягу, тип рухомого складу, інформування машиніста про стан тягової апаратури (ПА) та інше;

– прийом від центрального посту й інформування оператора про команди, що надходять, і прийняту інформацію від ПА;

– обмін інформацією по усіх видах каналів обміну між ПА і системою автоматизації (СА), між СА сусідніх станцій, а також між СА і центральним постом;

– обмін дискретними сигналами з апаратурою, що не входить до складу СА;

– запобігання несанкціонованому доступу до роботи з СА.

Основними елементами станційної апаратури є:

– блок керування світлофорами – це трійний у цифровій частині пристрій із резервуванням силових ланцюгів керування вогнями. Блок забезпечує керування 10-ма світлофорними вогнями;

– блок керування стрілкою. Один блок забезпечує керування однією стрілкою, включаючи силову комутацію приводу. Блок є в цифровій частині пристроєм з резервуванням апаратури силових ланцюгів;

– блок убування-прибуття визначає факт зупинки потягу на станції із заданою точністю (фіксація зупинки потягу) у межах 30 см відносно розрахункової точки прицільного гальмування. Блок забезпечує зв'язок по радіоканалу при обміні необхідною інформацією для регулювання по графіку руху потягів;

– блок фазомодульного каналу (ФМ-каналу) є конструктивно закінченим

блоком, що забезпечує контроль рейкових ланцюгів (до 32-х точок підключення) і передачу команд допустимої швидкості.

Усі автоматизовані системи метрополітену є сучасними ЕМС з програмно-апаратними комплексами, створеними на базі мікропроцесорних систем і розроблені з урахуванням спадкоємності і досвіду впровадження передових технічних рішень.

Наприклад, широке розповсюдження мають інтелектуальні системи забезпечення, моніторингу та керування електроживленням. У них використовується модулі передачі даних, інтегруючи блоки електроживлення і модулі моніторингу. Основні функції системи показані на рисунку 2.35.



Рисунок 2.35 – Інтелектуальна система живлення та моніторингу

Керування (ПА) відбувається автоматизованою системою безпеки руху пасажирських електропотягів (рис. 2.36), яка встановлюється в потягах і

може бути використана також як пристрої сигналізації і регулювання швидкості.



Рисунок 2.36 – Автоматизована система керування апаратурою потягу

Функції, які забезпечує ПА:

- автоматизований режим ведення потягу за участю машиніста. ПА забезпечує 3 режими роботи: режим автоведення, режим контролю швидкості, режим обмеження швидкості;

- керування потягом при підході і зупинці на станції: прицільне гальмування, фіксацію прибуття потягу на станцію, формування команди відкриття дверей;

- керування потягом на станції: відлік і індикація часу планової стоянки потягу на станції; формування команди вимкнення електричного гальма, увімкнення зумера (сигнал дозволу відправлення), закривання дверей і контроль закривання дверей, увімкнення і вимкнення тяги; фіксацію відправлення потягу зі станції, установку й індикацію ознак, що визначають режим керування рухом потягу по перегону;

- регулювання швидкості керування гальмуванням потягу на перегоні: формування команд гальмування у разі перевищення заданої різниці між допустимою, отримуваною по рейковому каналу, і фактичною швидкостями потягу; гальмування за ознакою пошкодження ПА до повної зупинки потягу; контроль спрацьовування пневмогальмів, виключення скачування потягу більш, ніж на один оборот колеса;

- автоматичне переведення ПА в режими, що забезпечують безпечний стан; контроль і діагностику ПА з індикацією на дисплеї.

Для керування рухом потягу мікропроцесорна система ПА використовує інформацію бази даних і інформацію, що отримується по послідовному інтерфейсу CAN. Основні блоки ПА складаються з:

- блока обчислювальної системи, що призначений для обробки інформації і реалізації функціональної програми системи шляхом керування рухом ЕРПр із забезпеченням заданих режимів ведення потягу (керування тягою і гальмуванням);

- блока керування, що призначений для зв'язку зі схемою керування потягом і контролюючись обчислювальною системою;

- блока зв'язку, що призначений для прийому, обробки і передачі в обчислювальну систему інформації про фактичну швидкість руху і місце розташування потягу, швидкості, що надходить від датчиків шляху, і від датчиків корекції шляху. Крім того, блок зв'язку слугує для прийому по індуктивному каналу сигналів допустимої швидкості руху потягу, їхньої гальванічної розв'язки, фільтрації, дешифрування і перетворення в цифрову форму. Уся інформація формується в пакети і передається через CAN- порти;

- блока радіозв'язку, який призначений для обміну даними між станцією і потягом. Блок забезпечує незалежний додатковий канал отримання інформації про допустиму швидкість і дозвіл на відкриття / закриття дверей, що забезпечує режим автоведення;

- датчиків швидкості і шляху. Кожен датчик здійснює вимір фактичної швидкості і пройденого шляху, а також визначає напрям руху потягу;

- датчиків корекції шляху, що призначені для фіксації сигналу від контрольної мітки з відомими координатами, і встановлені в тунелі по шляху дотримання потягу, формування сигналів, які забезпечують корекцію значень координат, місця розташування потягу на перегоні і уточнення значень діаметра бандажа колісної пари.

Завдяки існуючим транспортним підприємствам створюються багато видів громадського транспорту (тролейбусів, трамваїв, метро, електробусів, електромобілів тощо). Усі вони є звичайними способами переміщення в нашому повсякденному житті. Проте науково-технічний прогрес не стоїть на місці. І прикладом у світі є такий сучасний електротранспорт, якого у нас в Україні ще не існує або тільки з'являється (рис. 2.37).



Рисунок 2.37 – Перспективні види електротранспорту

Наприклад, незвичайна підвісна залізниця, що в місті Вупперталь, Німеччина, яка перевозить щодня понад 80 тисяч пасажирів на 13,5 кілометрів, або транспорт, що створює перевезення пасажирів як по землі, так і воді, електротранспорт, термінальні комплекси аеропортів тощо.

Питання впровадження новітніх засобів автоматизації руху МЕТ – це одне з головних напрямків модернізації та реконструкції у місті. Постійне оновлення конструкцій МЕТ та впровадження інноваційних сучасних технологій в електротранспорті складає один із напрямків розвитку інтелектуальної системи «розумне місто» (рис. 2.38).

Розвинена транспортна система підвищує статус міста, перетворюючи його в розумний об'єкт інтелектуальних можливостей.



Рисунок 2.38 – Схема інтелектуальної системи «розумне місто»

Від ступеня розвитку транспортної інфраструктури залежить рівень прогресу економіки як окремого міста, так і населеного пункту, регіону і країни загалом.

Отже, з урахуванням особливостей розвитку сучасної електротранспортної системи і використанням електромехатронних модулів, комплексів та технологій підкреслюється їхня особливість, яка орієнтована на підвищення безпеки та ефективності транспортного процесу, комфортності для водіїв і користувачів.

Контрольні запитання

1. Тенденції створення електромехатронних систем.
2. Назвіть сфери застосовується електромехатроніки.
3. Об'єкти та елементи електромехатроніки, вимоги до їхніх систем.
4. Головні функції пристрою комп'ютерного керування.
5. Структура сучасного електроприводу промислового механізму.
6. На чому базується розрахунок параметрів електроприводу?
7. Назвіть основні параметри динамічних характеристик.
8. Проаналізуйте особливості електромехатронних модулів.
9. Поняття електромехатронного модуля.
10. Характеристика інтелектуального електромехатронного модуля руху.
11. Призначення інформаційно-вимірювальних електромехатронних модулів.
12. Дайте визначення інтелектуальної електромехатронної машини.
13. Рівні інтеграції електромехатронних систем.
14. Загальні визначення роботи електромехатронних пристроїв за низкою ознак та принципів.
15. Інтелектуальні модульні системи електромехатронних комплексів.
16. Головні переваги під час використання інтелектуальних електромехатронних елементів у електромеханічних комплексах.
17. Інтелектуальні транспортні системи і технології в інфраструктурі міст.
18. Поняття інтелектуальної транспортної системи.
19. Назвіть компоненти транспортних систем.
20. Загальна інтелектуальна структура транспортної системи міста.

3 ЕЛЕМЕНТИ КЕРУВАННЯ В СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСАХ ТА СИСТЕМАХ

3.1 Мікропроцесорні системи та їхні структури

Сучасне керування електромехатронними системами та комплексами базується на роботі мікропроцесорів та мікроконтролерів, які широко застосовуються в енергетиці, транспорті, промисловому виробництві та інших галузях.

Мікропроцесор (МП) – це мікроелектронний програмований пристрій у вигляді мікросхеми, призначений для обробки інформації та керування процесами обміну у складі мікропроцесорної системи (рис. 3.1).

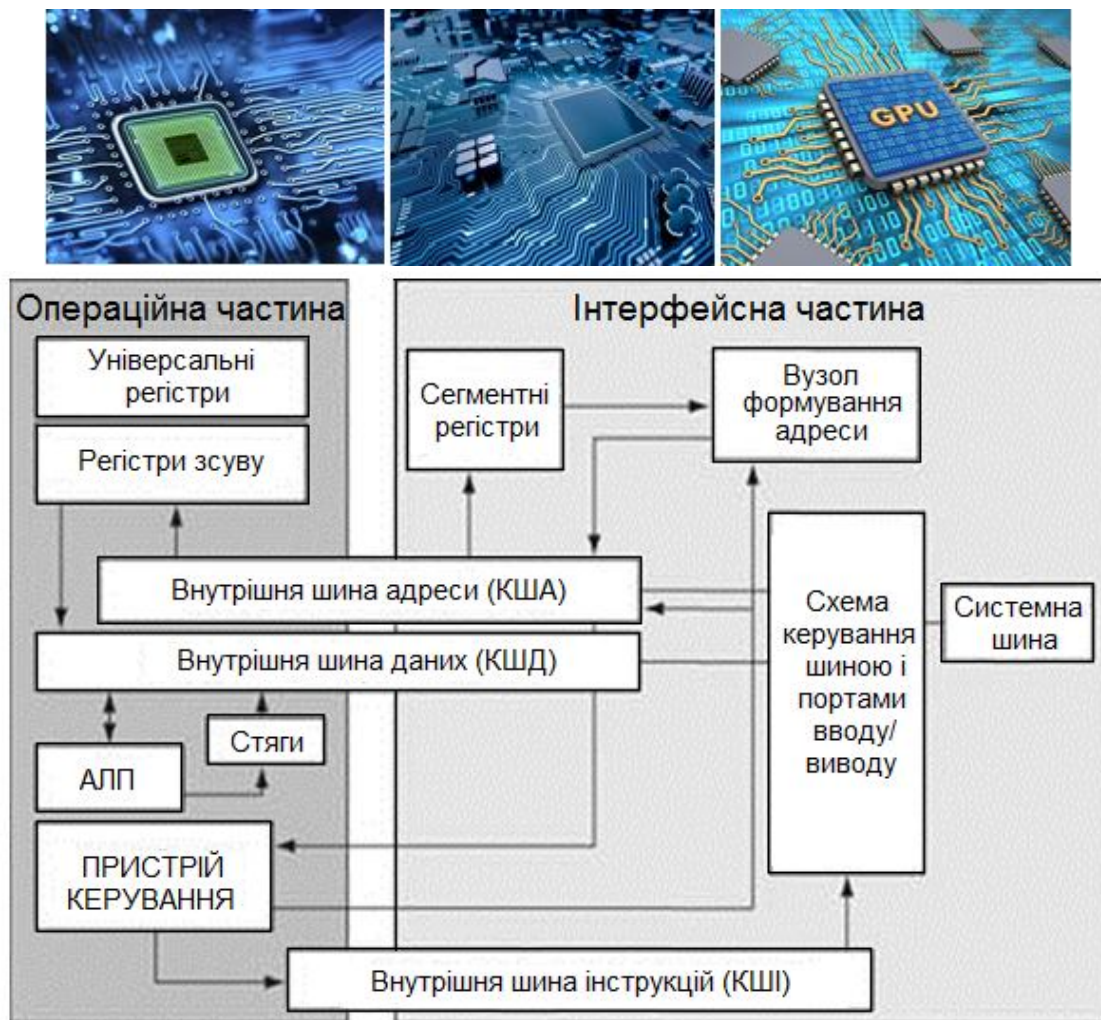


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд мікропроцесора та основні елементи

За допомогою технологій сучасної мікроелектроніки МП створюються на основі напівпровідникового кристала. Інформація у МП передається завдяки електричним імпульсам.

Конструктивно МП виконується у вигляді мікросхем, які мають пластиковий або керамічний корпус. Усередині корпусу розміщується мініатюрна напівпровідникова підкладка [1].

На цій підкладці лазером «накреслені» всі електронні схеми МП. Входи та виходи схеми на підкладці з'єднані з металевими виводами, розташованими з боків або знизу корпусу мікросхеми.

Мікропроцесорні системи загалом універсальні. Вони здатні виконувати широке коло завдань із обробки інформації, а на виконання конкретного завдання мікропроцесор «налаштовується» за допомогою програми (послідовного переліку машинних команд) [1].

Основні функції МП:

- читання даних з основної пам'яті і регістрів адаптерів зовнішніх пристроїв;
- прийому і обробки запитів і команд від адаптерів на обслуговування зовнішніх пристроїв;
- обробки даних і їхній запис в основну пам'ять і регістри адаптерів зовнішніх пристроїв;
- вироблення керуючих сигналів для всіх інших вузлів і блоків комп'ютера.

До складу МП входять такі пристрої.

1. Арифметико-логічний пристрій (АЛП) призначений для виконання всіх арифметичних і логічних операцій над числовою і символьною інформацією.

2. Пристрій керування, що координує взаємодію різних частин комп'ютера. Виконує такі основні функції:

- формує та подає в усі блоки машини у потрібні моменти часу певні сигнали управління (керуючі імпульси), що обумовлені специфікою виконання різних операцій;
- формує адреси комірок пам'яті, які використовуються для виконання операції і передає ці адреси у відповідні блоки комп'ютера;
- генератора тактових імпульсів зі зворотною їхньою послідовністю.

3. Мікропроцесорна пам'ять призначена для короткочасного зберігання, запису та видачі інформації, що використовується в обчисленнях у найближчих тактах роботи машини. Мікропроцесорна пам'ять будується на регістрах і використовується для забезпечення високої швидкодії комп'ютера, тому що основна пам'ять не завжди забезпечує швидкість запису, пошуку і зчитування інформації, необхідну для ефективної роботи швидкодіючого мікропроцесора.

4. Интерфейсна система мікропроцесора призначена для зв'язку з іншими пристроями комп'ютера і має:

- внутрішній інтерфейс мікропроцесора;
- буферні регістри, що запам'ятовують;
- схеми управління портами введення-виведення (сполучення, що дозволяє під'єднати до мікропроцесора інший пристрій) і системні шини.

Усі мікропроцесори можна поділяти на групи:

- мікропроцесори типу CISC з повним набором системи команд;
- мікропроцесори типу RISC зі скороченим набором системи команд;
- мікропроцесори типу VLIW, які мають надвеликі команди;
- мікропроцесори типу MISC з мінімальним набором системи команд і дуже високою швидкістю та ін.

Найважливішими характеристиками мікропроцесора є:

- тактова частота (МГц), що характеризує швидкість комп'ютера.
- Режим роботи процесора задається мікросхемою, яка називається генератором тактових імпульсів. На виконання процесором кожної операції відводиться певна кількість тактів. Тактова частота вказує, скільки елементарних операцій виконує мікропроцесор за одну секунду;

– розрядність процесора – це максимальна кількість розрядів двійкового числа, над яким одночасно може виконуватися машинна операція. Чим більше розрядність процесора, тим більше інформації він може обробляти в одиницю часу і тим більше, за інших рівних умов, продуктивність комп'ютера. Залежно від архітектури мікропроцесори поділяють на конструкції:

- із фіксованою розрядністю і списком команд (однокристалні);
- із нарощуваною розрядністю (секційні) і мікропрограмованого керування.

Структура мікропроцесора є конфігурацією складових логічних схем і зв'язків між ними, що визначається функціональним призначенням. Саме структура задає склад логічних блоків мікропроцесора і їхній зв'язок між собою. Це виконується для відповідності архітектурним вимогам пристрою. Спрацьовування електронних блоків мікропроцесора в певній послідовності спричиняє виконання заданих архітектурою мікропроцесора функцій та реалізацію обчислювальних алгоритмів. Одні і ті самі функції можна виконати в мікропроцесорах зі структурою, що відрізняється набором, кількістю і порядком спрацьовування логічних блоків. Різні структури мікропроцесорів, зазвичай, забезпечують різні можливості, зокрема і різну швидкість обробки даних. Логічні блоки мікропроцесора з розвиненою архітектурою та виконавчі операції показані на рисунку 3.2.

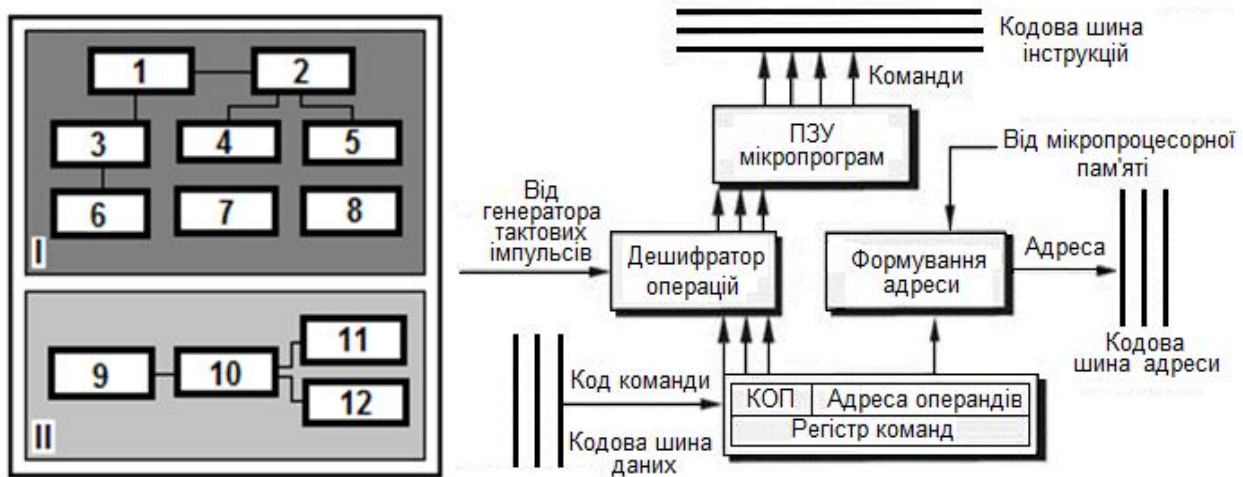


Рисунок 3.2 – Загальна логічна структура мікропроцесора та виконавчі операції: I – керуюча частина, II – операційна частина,

1 – блок синхронізації; 2 – блок управління послідовністю команд; 3 – блок керування введенням/виводом; 4 – блок управління виконанням операцій; 5 – блок управління формуванням кодів адрес; 6 – блок управління віртуальною пам'яттю; 7 – блок захисту пам'яті; 8 – блок управління перериванням роботи процесора; 9 – реєстровий надоперативний пристрій; 10 – арифметико-логічний блок; 11,12 – блоки додаткової арифметики

Програмна логіка пристрою забезпечує високу логічну гнучкість та сповільнення мікропроцесорів, що визначає можливість їхнього широкого використання і багатосерійного виробництва.

Особливості мікропроцесорних рішень дозволяє розвивати і модифікувати систему. Зміна технічних вимог щодо інформаційно-керуючої мікропроцесорної системи веде лише до необхідності перепрограмування роботи мікропроцесора.

Для мікропроцесорів важливою характеристикою є команди і їхній формат. Вони визначають структурні елементи, у яких інтерпретуються команди при виконанні операцій. Серед таких елементів (полів) команди виділяють такі: код операції, що визначає виконувану дію; адреса комірки пам'яті, регістр процесора, зовнішній пристрій; режим адресації; операнди при використанні безпосередньої адресації; код аналізованих ознак для команд умовного переходу.

Класифікація команд за основними ознаками подана на рисунку 3.3. Найважливішим структурним елементом формату будь-якої команди є код операції (КОП), що визначає дію, яка має бути виконана.

Залежної від використання команд існує кілька підходів щодо класифікації мікропроцесорів по типу архітектури. Наприклад, мікропроцесор типу CISC (Complete Instruction Set Computer) з архітектурою, яка характеризується повним набором команд.

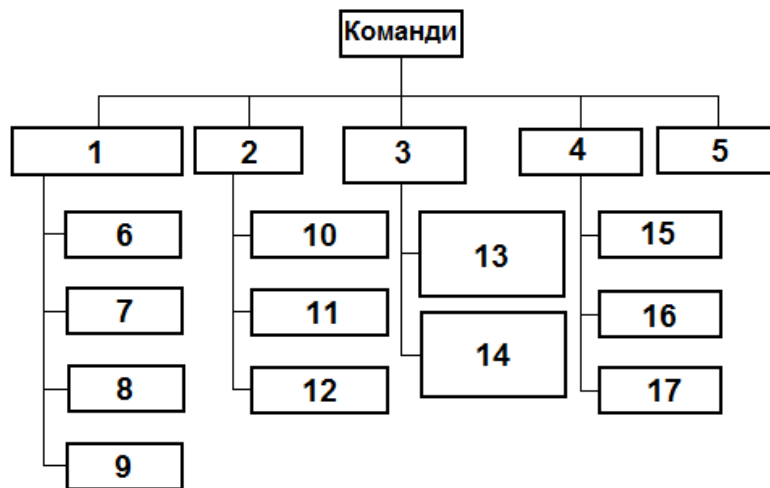


Рисунок 3.3 – Класифікація команд та їхніх функцій:

1 – за функціональним призначенням; 2 – за кількістю адрес; 3 – за способом кодування команд; 4 – за довжиною команди; 5 – за способом адресації;
 6 – передавання даних; 7 – обробка даних; 8 – передача керування; 9 – додаткові;
 10 – без адресні; 11 – одноадресні; 12 – двоадресні; 13 – з фіксованим полем КОП;
 14 – з розширеним полем КОП; 15 – довжиною в одне слово (байт);
 16 – довжиною в два слова (байта); 17 – довжиною в три слова (байта)

Мікропроцесор типу RISC (Reduce Instruction Set Computer) має архітектуру, яка визначає систему зі скороченим набором команд однакового формату, які виконуються за один такт.

Загалом, під архітектурою розуміють сукупність таких компонентів і характеристик:

- розрядності адрес і даних;
- складу, імен і призначення програмно-доступних регістрів;
- форматів і системи команд;
- режимів адресації пам'яті;
- способів машинного представлення даних різного типу;
- структури адресного простору;
- способи адресації зовнішніх пристроїв і засобів виконання операцій введення / виводу;
- класів переривань, особливостей ініціювання та обробки переривань.

Основні типи архітектурних рішень МП (рис. 3.4) мають зв'язок зі способами адресації пам'яті і поділяються на реєстрову і стекову архітектуру.

Реєстрова архітектура (рис. 3.5) визначається наявністю великого реєстрового файлу всередині МП. Команди отримують можливість звернутися до операндів, що розташовані в одній з двох запам'ятовувальних середовищ (оперативної пам'яті або регістрах).

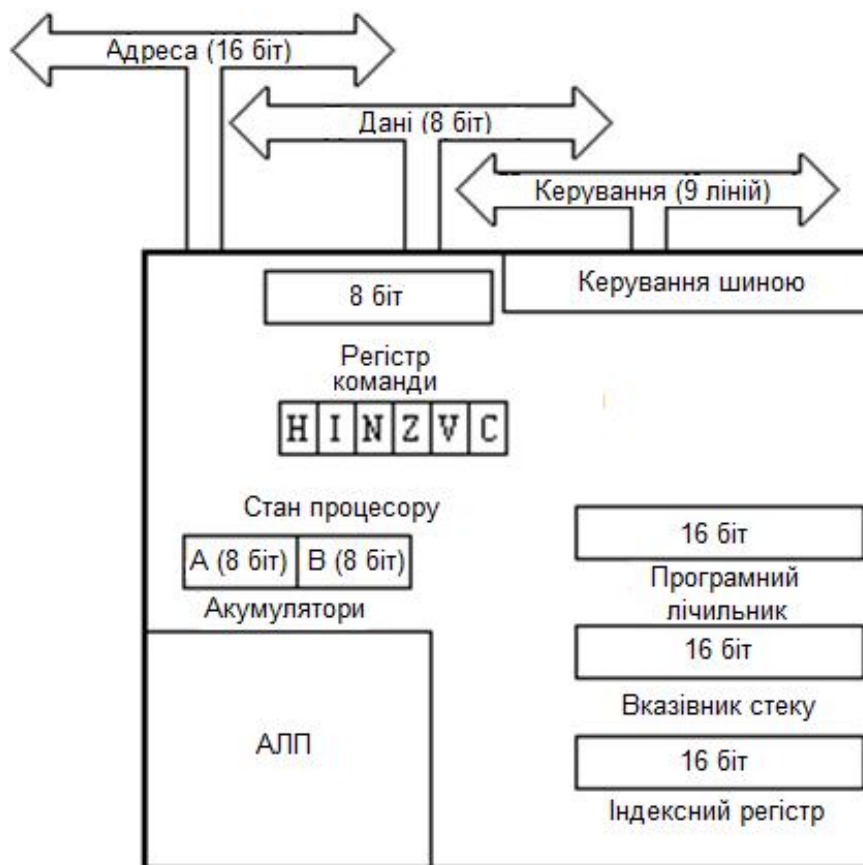


Рисунок 3.5 – Реєстрова архітектура мікропроцесора

Розмір реєстру фіксований і збігається з розміром слова, яке фізично реалізовано в оперативній пам'яті (файлу). Типовим є виконання арифметичних операцій тільки в реєстрі. Разом із тим команда містить два операнда (обидва операнда в реєстрі або один операнд у реєстрі, а другий в оперативній пам'яті).

Мікропроцесор містить два акумулятори, і результат операції АЛП міг бути поміщений у будь-який із них. Структури також мають автоматичне збереження в стеці вмісту всіх реєстрів процесора при обробці переривань.

Стекова архітектура дає можливість створити поле пам'яті з упорядкованою послідовністю запису і вибірки інформації. У загальному випадку команди неявно адресуються до елемента стека, розташованого на його вершині, або до двох його верхніх елементів.

Сучасна архітектура МП, орієнтована на оперативну пам'ять (типу «пам'ять-пам'ять»), що забезпечує високу швидкість роботи і велику інформаційну ємність робочих реєстрів і стека при їх організації в оперативній пам'яті. Архітектура такого типу не передбачає явного визначення акумулятора, реєстрів загального призначення або стека. Усі операнди команд адресуються до області основної пам'яті.

Мікропроцесор не може працювати сам по собі. Він є центральною ланкою мікропроцесорної системи, у яку також входять пристрої постійної та оперативної пам'яті, пристрої введення й виведення інформації, накопичувачі на жорстких магнітних дисках (так звані «вінчестери») тощо.

3.2 Мікроконтролерні пристрої і їхні структурні елементи

Мікроконтролер (МК) – це спеціалізований мікроелектронний програмований пристрій. Мікроконтролер, на відміну від мікропроцесора, має інтегровані пристрої введення-виведення, таймери й інші периферійні елементи, що входять у мікросхему. Він призначений для керування системами передачі даних і технологічними процесами.

Типовий МК поєднує на одному кристалі функції процесора і периферійних пристроїв. Фактично це однокристальний комп'ютер, здатний виконувати прості завдання.

Наразі існує безліч різних платформ і сімейств мікроконтролерів, однак призначення, застосування і функціонування їх майже однакові.

До основних структурних елементів МК (рис. 3.6) належать: пам'ять даних (оперативна пам'ять), пам'ять програм (постійна пам'ять), генератор тактових імпульсів, таймери, лічильники, паралельні та послідовні порти. Завдяки цьому система мінімальної конфігурації на основі мікроконтролера може складатися з блока живлення, безпосередньої мікросхеми контролера й декількох пасивних елементів (резисторів, конденсаторів і кварцового резонатора).

Розглянемо функціональні особливості деяких елементів МК.

Арифметико-логічний пристрій (АЛП) – призначено для виконання арифметичних і логічних операцій в сукупності з регістрами загального призначення АЛП, що виконує функції управління процесора.

Оперативно - запам'ятовувальний пристрій (ОЗП) – призначено для тимчасового зберігання даних при роботі МК.

Пам'ять програм виконана у вигляді перепрограмованої постійної пам'яті і призначена для запису програми керування МК (прошивка).

Пам'ять даних застосовується для зберігання всіх можливих констант, табличних значень функцій і тощо.

У своєму складі МК може мати й інші допоміжні елементи.

Аналоговий компаратор – призначений для порівняння двох аналогових сигналів на його входах.

Таймери – застосовуються для здійснення різних затримок і установки різних інтервалів часу в роботі МК.

Аналогово-цифровий перетворювач (АЦПр) необхідний для введення аналогового сигналу в МК та переведення аналогового сигналу в цифровий.

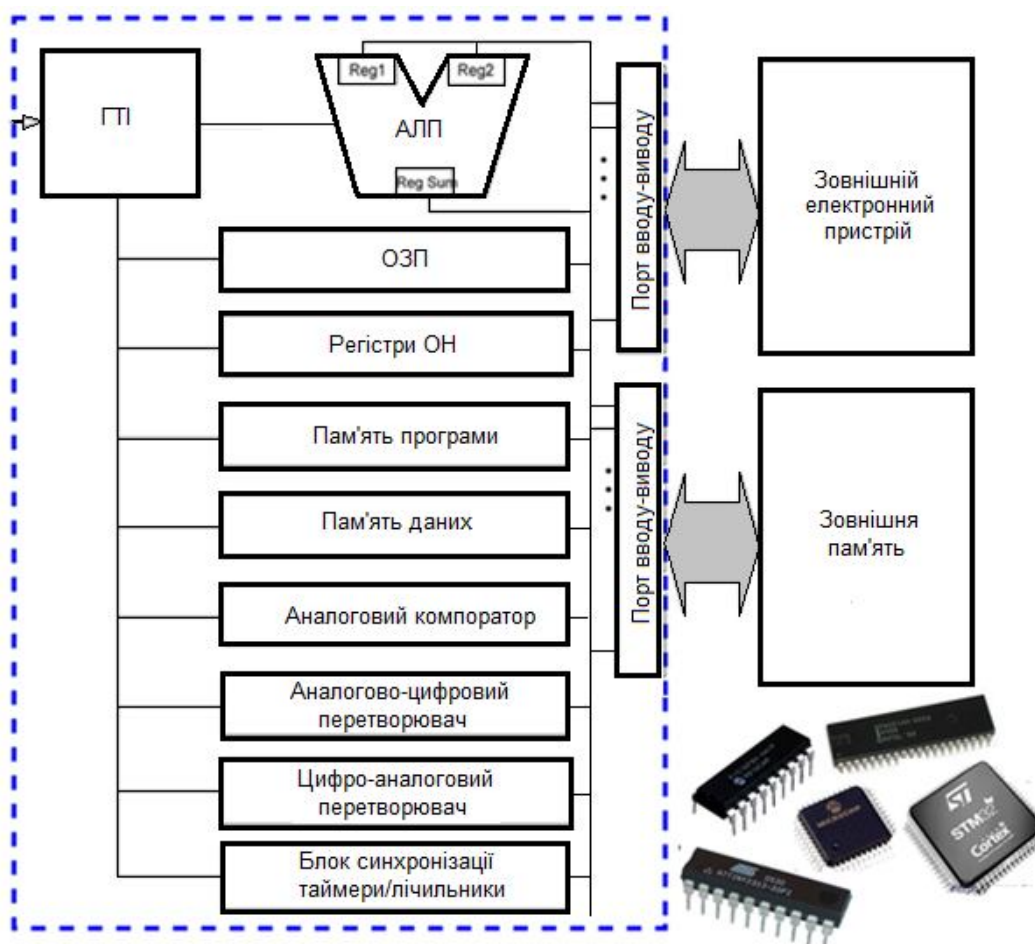


Рисунок 3.6 – Структурні елементи мікроконтролера та його загальний вигляд

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) виконує зворотну функцію, тобто сигнал із цифрового виду перетворює в аналоговий вид.

Робота мікроконтролера синхронізується тактовими імпульсами з генератора і керується пристроєм управління.

Основне призначення МК (рис. 3.7) – це управління різними електронними пристроями.

Мікроконтролер має невелику розрядність (8–16 біт) і багатий набір команд маніпулювання окремими бітами. У складі мікросхеми МК присутні всі необхідні елементи для побудови системи керування (рис. 3.8).

Типова архітектура МК містить систему синхронізації та керування (1), арифметико-логічний пристрій (2), регістри загального призначення (3), пам'ять даних (4) і пам'ять програм (5), порти (6), функціональні пристрої (таймери, лічильники, широтно-імпульсні модулятори, інтерфейси) і регістри для їх налаштування (7).

Програми для МК створюють у спеціальних інтегрованих

інструментальних середовищах (*Integrated Development Environment, IDE*) мовами асемблера (машинних команд) або C ++.



Рисунок 3.7 – Сфери застосування мікроконтролерів [1]

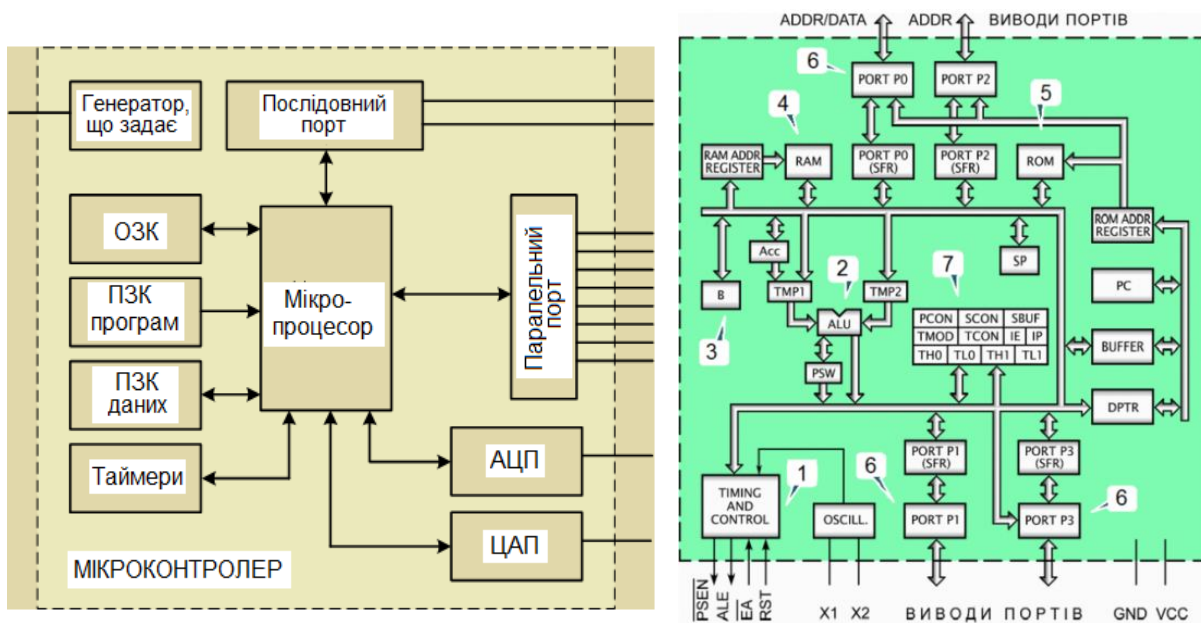


Рисунок 3.8 – Приклад архітектури сучасного типового мікроконтролера [1]

Крім МП загального призначення та МК, на ринку пропонуються так звані сигнальні процесори, які спеціально призначені для обробки сигналів у режимі реального часу. Вони використовуються в системах електропостачання, вимірювальних приладах, засобах зв'язку, передачі й відтворення аудіо- та відеопотоків, системах локації та інших. Для визначення необхідних параметрів створюються блок-схеми алгоритмів роботи систем (наприклад, рис. 3.9).

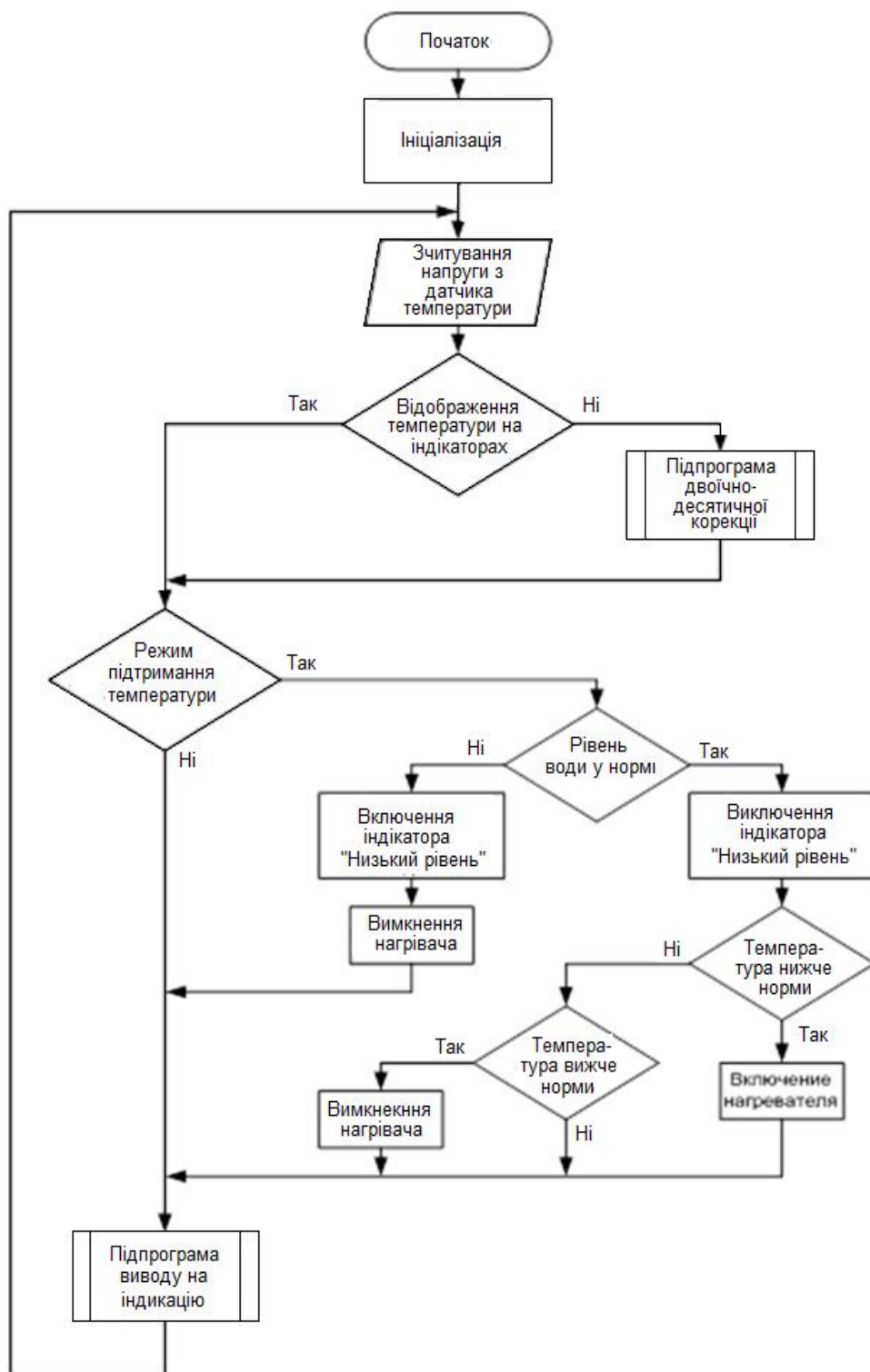


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритму роботи мікропроцесорної системи керування

Таким чином, показані інтелектуальні системи керування відкривають широкі можливості для їхнього використання в електромехатронних комплексах. Наприклад, легко переходити на системи іншого виробника, переносити програми з однієї платформи на іншу тощо. Завдяки використанню таких інтелектуальних систем підвищується гнучкість

процесів автоматизації, що сприяє конкурентному інноваційному розвитку світового досвіду.

3.3 Приклад роботи інтелектуальних систем

В автоматизованих системах деяких виробництв існує проблема збору інформації, яка полягає в рознесенні у просторі контролювальних елементів. У результаті відбуваються втрати необхідних даних або їхнє пошкодження. Рішення такої проблеми можливо з використанням мікропроцесорних систем або комплексів, які мають необхідні характеристики і параметри.

Розглянемо автоматизовану систему обліку витрат рідини і газу з використанням датчиків. Така система збирає дані про температуру, тиск і інші виміри, що обробляються відповідним алгоритмом (рис. 3.11).

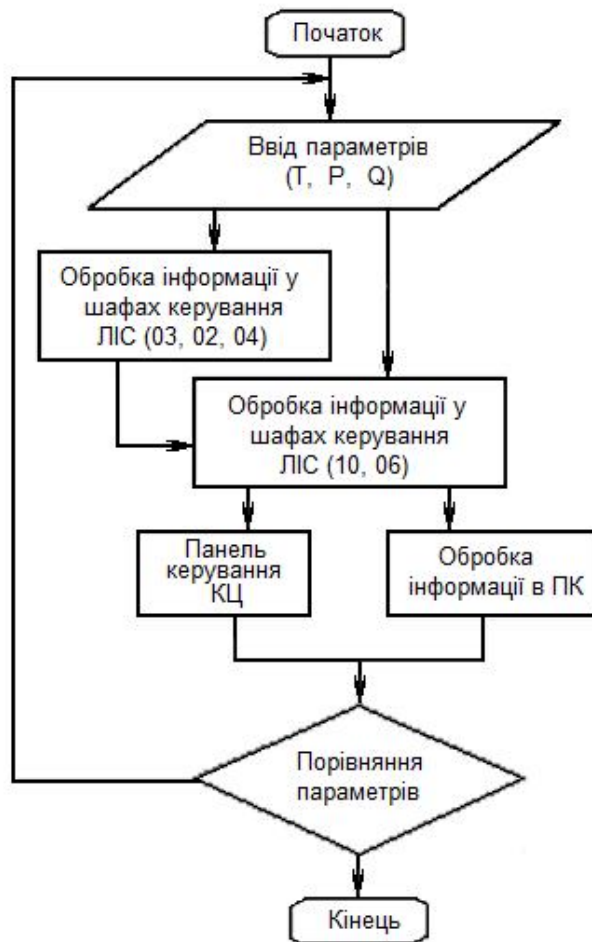


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритму опитування датчиків

Як центральний процесор застосовується звичайний офісний комп'ютер. Для проведення вимірів параметрів і передавання даних по каналах зв'язку до комп'ютера використовуються контролери. Вони

встановлюються у шафах керування. Як канал зв'язку використовується послідовний інтерфейс RS485. Основні технічні характеристики наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики інтерфейсу системи

Параметр	Значення
Тип лінії зв'язку	симетрична
Вихідна напруга передавача без нагрівання., В	$\pm (1,5...6)$
Вихідна напруга передавача при нагріванні., В	$\pm (1,5...6)$ $R_n = 5 \text{ Ом}$
Струм короткого замикання на загальний провід, mA	менше 250
Синфазна напруга на виході передавача, В	-1...+3
Синфазна напруга на вході передавача, В	-7...+11
Чутливість приймача, В	$\pm 0,2$ *
Вхідний опір приймача, kОм	більше 12
Максимальна довжина кабелю, м	1 200
Максимальна швидкість передачі, Мб / с	10 **
Кількість приймачів, які навантажуються на один передавач	32
<p>* У разі застосування оптронної розв'язки чутливість може виявитися нижче порядку 0,5 В через падіння на переході вхідного світлодіода.</p> <p>** Реальна швидкість залежить від довжини кабелю і застосування схем передавачів і приймачів.</p>	

Під час контролю датчики знімають параметри системи. Отримана інформація надходить у шафи керування лінійної інформаційної системи (ЛІС), де відбувається її обробка і виведення на панель управління комп'ютерного центру (КЦ) і на головний комп'ютер. Якщо отримані параметри менше заданих значень, то алгоритм повертається на початок, і відбувається наступний цикл опитування, в іншому випадку відбувається коригування параметрів у заданому на ПК автоматичному режимі. Результати визначення параметрів зводяться в таблицю 3.2.

Для визначення параметрів обирається мікропроцесор, його структурна схема і основні характеристики. У цьому випадку обраний однокристальний 16-розрядний МК цифрової обробки сигналів (ПЦОС) типу 1867BM2.

Мікросхема 1867BM2 становить собою універсальний цифровий сигнальний процесор сімейства 1867 призначений для використання в швидкодіючих системах обробки сигналів. Процесор 1867BM2 широко використовується в системах синтезу і розпізнавання мови, обробки сигналів з локаційних або оптичних датчиків і в системах цифрового керування.

Таблиця 3.2 – Параметри датчиків системи

Найменування елемента	Тип	Інтенсивність відмов λ
датчик тиску	Метран-100	0,0000381
датчик температури	ТХ 6273	0,0000189
датчик газів (горючих)	ТХ6383	0,0000228
датчик витрат	ТХ6001	0,0000263
шкаф керування	ЛІС-4510	0,000004
головний комп'ютер	Стандартний	0,0000221

Він має такі параметри:

- Корпус 88 – вивідний планарний типу 4229.88-3;
- 32 порта введення / виведення (для підєднання інших пристроїв);
- 8 допоміжних регістрів загального призначення зі своїм арифметичним блоком для непрямого адресування;
- Вхід синхронізації для організації синхронізованих мультипроцесорних систем;
- Наявність станів очікування для зв'язку з повільними зовнішніми пристроями;
- Три джерела зовнішніх переривань, що маскуються;
- Можливість повторення інструкцій.

Основні характеристики мікропроцесору показані в таблиці 3.3. Структурна схема процесора 1867BM2 показана на рисунку 3.11, а електричні характеристики його мікросхеми наведені в таблиці 3.4.

Розведення виводів мікросхеми 1867BM2 та схема вивідного корпусу LCC88 мікропроцесору (вид зверху) показані на рисунку 3.12.

Функціональне призначення виводів зведено в таблицю 3.5.

Для оцінки виміру температури використовується мікроконтролер, який виконує команду «Перетворення температури». Після завершення перетворення, результат вимірювання температури знаходиться в регістрах температури. Датчик вимірює температуру в градусах за шкалою Цельсія.

Результат вимірювання температури датчиком температури представляється як 16-розрядний, і має знакове число в додатковому коді (рис. 3.13.).

Біт знака (S) дорівнює 0 для позитивних чисел і 1 для негативних. У таблиці 3.6 показані приклади відповідності цифрових кодів значенням температури.

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики мікропроцесора

Фіксована кома, біт	16
Продуктивність, операцій в секунду	10^7
Вбудований таймер	1
Тактова частота	40МГц
Тривалість циклу, нс	100
Обсяг пам'яті, що адресується	$128K \times 16$
Місткість вбудованого ПЗП	$4K \times 16$
Місткість вбудованого ОЗП	544×16
ОЗП команд / даних	256×16
ОЗП даних	256×16
КЕШ ОЗП команд	32×16
ПЗУ програм	$4K \times 16$
Розрядність АЛП, біт	32
Апаратний помножувач	16×16
Зсувний регістр, біт	0–16
Напруга живлення	+5В
Споживна потужність, Вт	P(max)
Послідовний порт	1
Діапазон робочих температур середовища	от 6 ⁰ до +85 ⁰ С

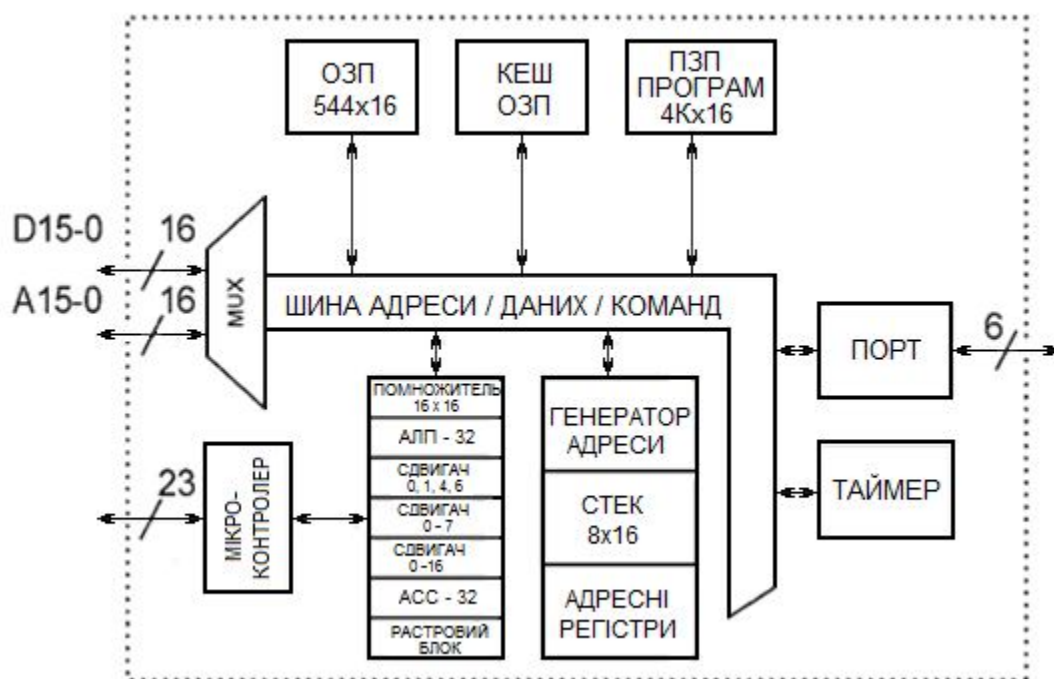


Рисунок 3.11 – Структурна схема процесора 1867BM2

Таблиця 3.4 – Електричні характеристики мікросхеми 1867BM2
($V_{CC}=4,75-5,25$ В; $V_{SS} = 0$ В)

Позначення	Параметр	Нормативні позначення		Одиниця виміру	Режим виміру
		не менше	не більше		
V_{ol}	Вихідна напруга низького рівня	–	0,6	В	$I_{ol} = 2$ мА
V_{oh}	Вихідна напруга високого рівня	2,4		В	$I_{oh} = -300$ мкА
V_{ozl}	Вихідний струм низького рівня у стані «вимкнено»	-20		мкА	$V_{ol} = 0,8$ В
V_{ozh}	Вихідний струм високого рівня у стані «вимкнено»		20	мкА	$V_{oh} = 2,4$ В
I_{li}	Струм витоку на входах		10	мкА	$V_{CC} = 5,25$ В
I_{cc1}	Струм споживання у робочому режимі		185	мА	$V_{CC} = 5,25$ В $f=40$ МГц
I_{cc2}	Струм споживання у режимі зниженої потужності		100	мА	$V_{CC} = 5,25$ В $f=40$ МГц

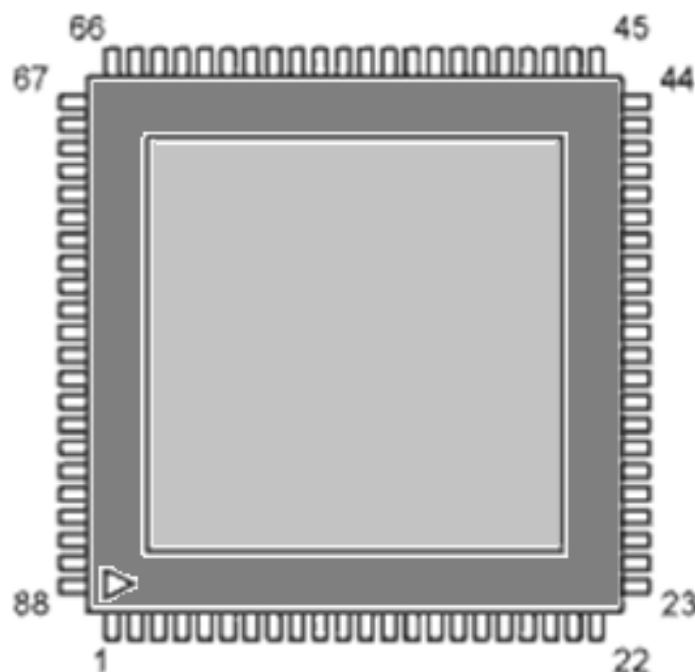


Рисунок 3.12 – Схема корпусу мікропроцесора

Таблиця 3.5 – Функціональне призначення виводів мікропроцесора

Вивід	Функціональне призначення	Вивід	Функціональне призначення	Вивід	Функціональне призначення
3	VCC	31	D01	61	A11
4	VCC	32	D00	62	A12
5	CLKX	33	SYNC	63	A13
6	CLKR	34	INT0	64	A14
7	RS	35	INT1	65	A15
8	READY	36	INT2	71	DS
9	HOLD	37	VCC	72	IS
10	BIO	38	DR	73	PS
11	VCC	39	FSR	74	R/W
13	MP/MC	40	A00	75	STRB
14	D15	47	A01	76	BR
15	D14	48	A02	77	X1
16	D13	49	A03	78	CLKIN
17	D12	50	A04	79	FSX
18	D11	51	A05	80	DX
19	D10	52	A06	81	HOLDA
20	D09	53	VSS	82	XF
21	D08	54	A07	83	CLKOUT2
25	D07	56	VCC	84	CLKOUT1
26	D06	57	VSS	85	MSC
27	D05	58	A08	86	IACK
28	D04	59	A09		
29	D03	60	A10		
30	D02				

Примітка. Виводи з номерами 53 і 57 з'єднані з кришкою МК і теплорозтікачем (підставою) корпусу. Висновки з номерами 1, 2, 12, 22, 23, 24, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 55, 66, 67, 68, 69, 70, 87, 88 не використовуються.

	біт 7	біт 6	біт 5	біт 4	біт 3	біт 2	біт 1	біт 0
Мол. байт	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}
	біт 15	біт 14	біт 13	біт 12	біт 11	біт 10	біт 9	біт 8
Ст. байт	S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4

Рисунок 3.13 – Результат вимірювання температури датчиком

Таблиця 3.6 – Дані відповідності даних і температури

Температура	Цифровий код (двійковий)	Цифровий код (Hex)
+125°C	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85 °C	0000 0101 0101 0000	0550h
+25.0625 °C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125 °C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5 °C	0000 0000 0000 1000	0008h
0 °C	0000 0000 0000 0000	0000h
– 0.5 °C	1111 1111 1111 1000	FFF8h
– 10.125 °C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
– 25.0625 °C	1111 1110 0110 1111	FE6Fh
– 55 °C	1111 1100 1001 0000	FC90h

Після виконання команди перетворення температури, виміряне значення порівнюється з верхнім і нижнім порогами з регістрів Th , Tl (наприклад, формат регістрів – рис. 3.14).

біт 7	біт 6	біт 5	біт 4	біт 3	біт 2	біт 1	біт 0
S	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0

Рисунок 3.14 – Формат регістрів Th і Tl

Порогові значення температур зберігаються в енергонезалежній пам'яті (EEPROM). Регістри Th і Tl доступні для читання і запису через байти оперативної пам'яті.

Контрольні запитання

1. Мікропроцесорні системи та їхня структура.
2. Призначення та основні функції мікропроцесора.
3. Пристрої, що входять до складу мікропроцесора.
4. На які групи можна поділяти мікропроцесори?
5. Назвіть головні характеристики мікропроцесора.
6. Мікроконтролерні пристрої і їхні структурні елементи.
7. Призначення та основні функції мікроконтролера.
8. Назвіть структурні елементи мікроконтролера.
9. Сфери застосування мікроконтролерів.
10. Наведіть приклади роботи інтелектуальних систем.

4 РОБОТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ

4.1 Основа робототехнічних комплексів

Робототехніка та електромехатроніка нерозривно пов'язані. Прогрес у сучасній робототехніці визначається переважно успіхами електромехатроніки, наприклад, шляхом мініатюризації та інтеграції функціональних компонентів. У сучасному світі процес роботизації технічних засобів є одним із найважливіших стимуляторів і каталізаторів розвитку електромехатронних технологій.

Роботизація передбачає неухильне підвищення вимог у галузі інтелектуалізації та комплексної автоматизації складних систем. Електромехатронні технології забезпечують цей процес шляхом створення проєктно-технологічного базису.

Технології роботобудування базуються на тих самих принципах, що й мехатронні та електромехатронні технології. Крім інтелектуалізації та мініатюризації, до них належить низка технологій макрорівня: уніфікація компонентів та інтерфейсного взаємозв'язку, інтеграція функцій і взаємне проникнення (конвергенція) різнорідних функціональних підсистем [1, 3, 11, 12].

Основу робототехнічних комплексів складають системи, які побудовані за модульним принципом і полягають у [1]:

- скороченні термінів створення та освоєння у виробництві і в експлуатації технічних модульних систем;
- проєктуванні систем, що зводиться до компонування зі стандартних компонентів, а їхнє виробництво – до збирання конструкцій. Такі технології організовані на будь-якому машинобудівному підприємстві;
- можливості необмеженого розширення номенклатури технічних систем, зокрема оперативне компонування різних їхніх модифікацій для конкретних разових застосувань;
- скороченні у декілька разів собівартості систем завдяки зменшенню вартості їхніх частин при переході до уніфікованих серійних модулів і зменшенні структурної та параметричної надмірності;
- скороченні витрат на розробку, експлуатацію та ремонт технічних модульних систем;
- зростанні їхнього технічного рівня, зокрема надійності, застосуванні відпрацьованих стандартних модулів.

Ефективність модульного принципу не виключає використання в робототехніці інших принципів побудови техніки. Наприклад, досвід промислової робототехніки показує, що під час проектування транспортних і вантажно-розвантажувальних роботів оптимальним принципом їхньої побудови є створення таких систем на основі попередньо відпрацьованих базових конструкцій. При створенні технологічних роботів для виконання таких операцій, як зварювання, різання, складання, часто виявляється найефективнішим агрегатний принцип проектування.

Робототехнічні модульні системи складаються з інтелектуальних машин. Узагальнена структура електромехатронної інтелектуальної машини, в основу побудови якої покладено структура автоматичних роботів, показано на рисунку 4.1.

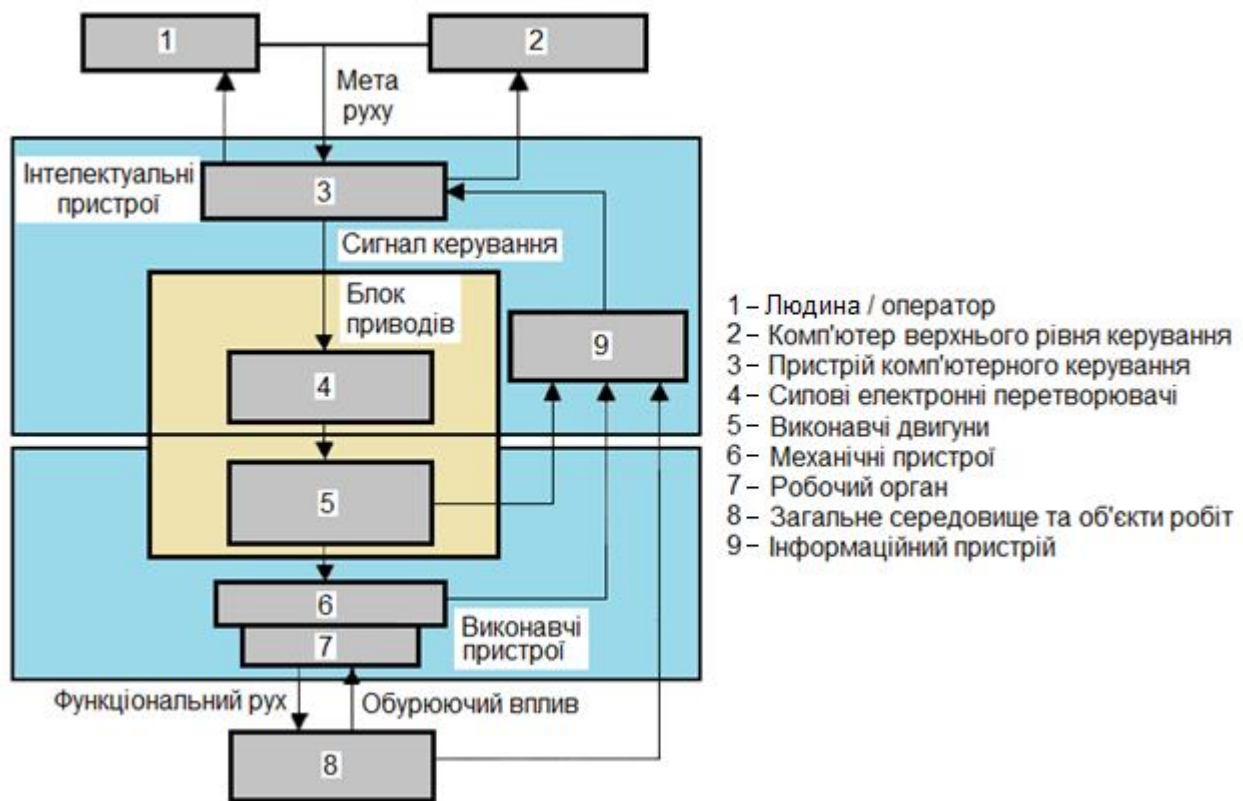


Рисунок 4.1 – Загальна структура електромехатронних машин [1]

Зовнішнім середовищем для машин цього класу є технологічне середовище, яке містить основне й допоміжне обладнання, технологічне оснащення та об'єкти робіт.

Характеристики технологічних середовищ визначаються за допомогою аналітико-експериментальних досліджень і методів комп'ютерного моделювання. Усе це впливає на роботу електромехатронної машини під час виконання заданого функціонального руху залежно від робочого органу і

об'єкта робіт. Наприклад, вплив сили різання на технологічну операцію механічної обробки, вплив реакції струменя рідини при гідравлічному різанні та інші [1].

До складу електромехатронної машини входять основні частини:

- механічний пристрій, кінцевою ланкою якого є робочий орган;
- блок приводів, що складається з силових перетворювачів і виконавчих двигунів;
- пристрій комп'ютерного керування, на вхід якого надходять команди людини-оператора або ЕОМ верхнього рівня керування;
- інформаційний пристрій, призначений для отримання й передачі до пристрою комп'ютерного керування даних про реальний рух машини та про фактичний стан його підсистем.

Механічний пристрій і двигуни об'єднані в групу виконавчих пристроїв. До складу групи інтелектуальних пристроїв включені електронна, керувальна та інформаційна частини машини.

Механічний пристрій електромехатронної машини є багатоланковим механізмом. Кінематичний ланцюг його утворюють рухомі ланки, складові кінематичні пари. Кінцевою ланкою кінематичного ланцюга є робочий орган.

Робочий орган електромехатронної машини – це складник механічного та електричного пристрою для безпосереднього виконання технологічних операцій та/або допоміжних переходів.

Прикладами робочих органів у робототехніці є такі пристрої: механічні, вакуумні й електромагнітні захватні, а також зварювальні кліщі (для точкового зварювання, рис. 4.2), інструментальні головки для механічної обробки й лазерних операцій, фарбувальний пістолет тощо.

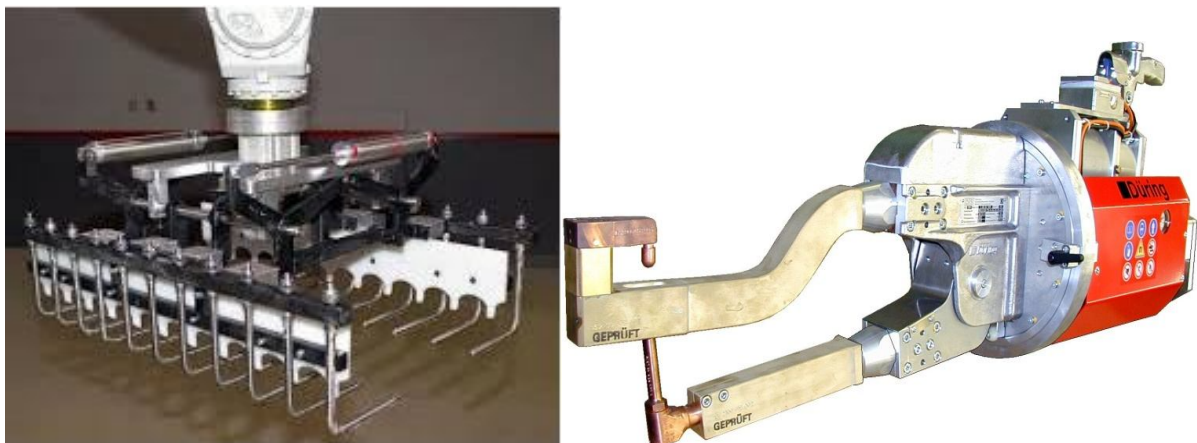


Рисунок 4.2 – Приклади робочих органів: захватні пристрої, зварювальні кліщі [1]

Робочий орган як керований модуль, який може мати декілька ступенів рухливості та складатися з декількох елементів. Тому під час його розроблення також можуть використовуватися електромехатронні принципи інтеграції.

Пристроєм комп'ютерного керування є комплекс апаратних і програмних засобів, що виробляє сигнали керування для блока приводів машини. До складу комплексу входять задавальні пристрої (наприклад, джойстики та рукоятки), пульт керування оператора, обчислювальні та перетворювальні пристрої, периферійні пристрої введення-виведення інформації.

Пристрій комп'ютерного керування виконує такі основні функції:

- керування функціональними рухами електромехатронної машини у реальному масштабі часу;
- координація керування механічним рухом із супутніми зовнішніми процесами;
- взаємодія з людиною-оператором через людино-машинний інтерфейс у режимах програмування та безпосередньо у процесі руху (режим «онлайн»);
- обмін даними із зовнішніми пристроями (інформаційним пристроєм, блоком приводів, комп'ютером верхнього рівня, периферійними пристроями).

Інформаційний пристрій призначений для збору й передачі в пристрій керування інформації про фактичний стан зовнішнього середовища й руху електромехатронної машини.

В інформаційному пристрої можна відокремити три групи сенсорів:

- давачі інформації про стан зовнішнього середовища й об'єктів робіт (системи технічного зору, локаційні давачі, далекоміри тощо);
- давачі інформації про рух механічної частини (давачі переміщень, швидкостей, прискорень, сил і моментів);
- давачі зворотнього зв'язку блока приводів (надають інформацію про поточні значення електричних струмів і напруг у силових перетворювачах).

Система інтелектуального управління машиною (комплекс верхнього рівня управління) в умовах неповної інформації зазвичай реалізується у вигляді комплексу програмних засобів на комп'ютері верхнього рівня керування.

Сучасні інтелектуальні модулі, вузли та системи легко перепрограмуються під нове завдання, що розширює функціональні можливості машин і механізмів. Як приклад розглянемо особливості конструкції та принцип дії роботизованої пневматичної системи (рис. 4.3).

Як робоче тіло в системі використовується газ (стиснене повітря), енергія якого і призводить робочий механізм у рух.

Пневматичний привод має компресор і пневмодвигун. У такому сполученні система здатна здійснювати перетворення механічної характеристики приводу відповідно до вимог навантаження.

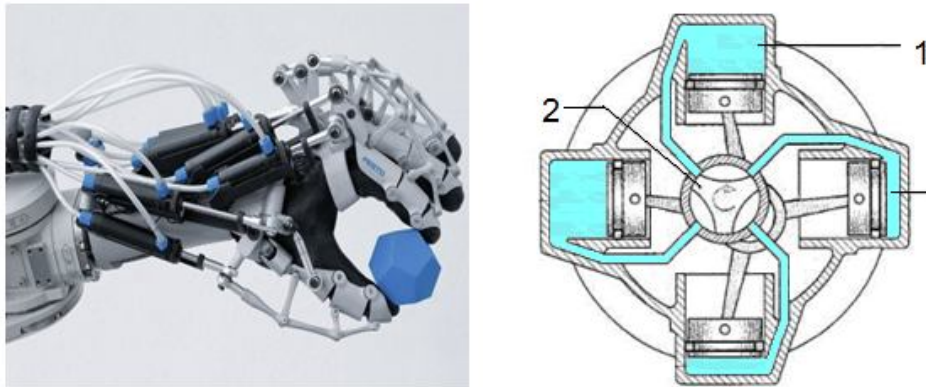


Рисунок 4.3 – Електропневматична система та основні елементи:

1 – робочі камери; 2 – розподільний пристрій повітря

Пневмоприводи поступального руху бувають двопозиційними, коли переміщення робочого органу здійснюється між двома крайніми положеннями, а також багатопозиційними, коли переміщення відбувається в різні положення.

За принципом дії пневмоприводи можуть бути однобічної дії (коли повернення в початкове положення забезпечує пружина) або двобічної (повернення в початкове положення і робітничий рух виробляються стислим повітрям). Пневмоприводи поступального руху поділяються переважно на два типи: поршневі та мембранні.

У поршневого пневмоприводу в циліндрі під дією стисненого повітря або пружини (у приводу однобічної дії) переміщується поршень.

У мембранного пневмоприводу (рис. 4.4) камера розділена мембраною на дві порожнини. Вона має з одного боку мембрану, на яку давить стиснене повітря, а з іншого боку до мембрани прикріплений шток, який приймає поздовжнє зусилля від мембрани.

Зокрема, пневматичний привід успішно застосовується в системах з цикловим управлінням, наприклад у маніпуляторах із горизонтальним переміщенням штока.

Функціонально пневмопривод можна розділити на чотири блоки: підготовки повітря, розподілу стисненого повітря, виконавчих двигунів, і системи передачі стисненого повітря в виконавчі пристрої.

У блоці підготовки повітря осушується і очищається від пилу.

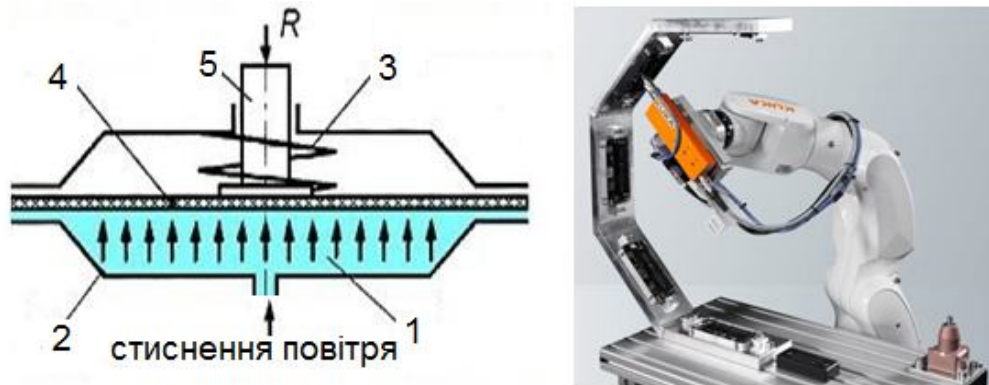


Рисунок 4.4 – Роботизований пневматичний привод
1 – робоча камера; 2 – корпус; 3 – возвратна пружина;
4 – мембрана; 5 – шток

Розподільний блок за програмою відкриває або закриває (за допомогою клапанів) подачу стисненого повітря в порожнині виконавчих двигунів.

Управління клапанами зазвичай проводиться за допомогою електромагнітів або також пневматичним способом (якщо середовище вибухонебезпечне). Блок виконавчих двигунів – це пневмоциліндри, поршні яких обертаються або рухаються прямолінійно. Вони відрізняються заданими переміщеннями, зусиллями і швидкостями.

Кожен двигун має свій робочий цикл, а послідовність циклів строго визначена технологічним процесом та контролюється відповідною програмою системи управління роботом. Система передачі стисненого повітря в різні пристрої використовує пневмоприводи з різним перетином, відповідно до поставленого завдання.

Загалом, передача і перетворення енергії в пневмоприводі виглядає так. Головний приводний двигун обертає компресор, який стискає повітря. Стиснене повітря потім подається через регулювальну апаратуру в пневмодвигун, де його енергія перетворюється в механічну (рух поршня, штока). Робочий газ викидається в навколишнє середовище.

Отже, під час створення будь-якої конструкції електромехатронної системи критичними, з погляду необхідності, є визначення принципово нових підходів щодо розробки, а також виконавчі й енергетичні компоненти, що вимагають у цих сферах організацію умов для проведення базових інновацій.

4.2 Головні елементи і параметри системних модулів роботів

Сучасні промислові роботи – це автоматичні машини з програмним керуванням, які замінюють функції людини під час виконання виробничих процесів. Вони належать до класу машин, які призначені для обслуговування технологічних процесів та автоматизації транспортних робіт, енергетичних систем тощо.

Роботи також застосовуються у таких операціях: зварювання, шліфування (рис. 4.5), фарбування, складання, вибірки та встановлення, пакування, контролю продукції і випробування тощо.



Рисунок 4.5 – Технологічні роботизовані комплекси

Широке їхнє застосування визначено надійністю, швидкістю і точністю. Це дає можливість створювати мобільні роботи і різні електромехатронні системи, які можуть пересуватися або змінювати положення своїх частин завдяки виконавчим механізмам. Напрямок переміщення тієї або іншої частини системи називається ступенем свободи. Чим більше ступенів свободи у виконавчого механізму – тим більше у робота або виконавчого пристрою рухливість.

Залежно від типу виконавчого пристрою досягається більш-менш якісна реалізація взаємодії частин машини, а також ефективність і гнучкість її роботи. Підбір типу виконавчого пристрою є складним завданням, яке вирішується на етапі конструювання системи інженерами робототехніки і технологами.

До роботизованих систем широкого застосування належать деякі технічні показники:

- *вантажопідйомність* – це найбільше значення маси об'єктів маніпулювання з урахуванням маси робочого органу, які можуть переміщатися «рукою» при заданих умовах. Для промислового робота з

багатьма «руками» вантажопідйомність визначають як суму вантажопідйомності всіх його «рук». Для деяких типів промислових робіт важливим показником є зусилля (або крутний момент), яке розвивається виконавчим механізмом (зусиллям затиску об'єкта, маніпулюванням пристроєм, робоче зусилля «руки» уздовж або поздовжньої осі, крутний момент при ротації пристрою тощо). За величиною вантажопідйомності промислові роботи поділяють на надлегкі (до 1 кг), легкі (до 10 кг), середні (до 200 кг), важкі (до 1000 кг), надважкі (понад 1 000 кг);

– *число ступенів рухливості* визначають як суму можливих координатних рухів його робочого органу або об'єкта маніпулювання щодо опорної системи. Для деяких типів робіт додатково враховують кількість ступенів рухливості пристрою, що захоплює. За ступенем рухливості промислові роботи (ПР) поділяють на три групи: малу (до 3-х ступенів); середню (4–6 ступенів) і високу рухливість (понад 6 ступенів). Число ступенів рухливості ПР значною мірою визначає його універсальність. Наприклад, сучасні ПР мають зазвичай 2–7 ступенів рухливості: найпростіші (1–2); найбільш складні – 7, іноді і більше. У структурі сучасного світового парку ПР переважають конструкції з 4 і 5 ступенями рухливості (67 %);

– *величини і швидкості переміщення (руху) робочого органу з кожного ступеня рухливості* характеризують геометрію робочого простору промислового робота. Особливості руху також впливають на орієнтацію об'єкта робочої зони та робочого простору. Усе це визначається механікою маніпулятора ПР і можливостями приводу. Величини переміщень по лінійних координатах задаються в (м), за кутовими (град. або рад.), швидкості в (м/с) тощо. За величиною лінійного переміщення, або ходу робочого органу, розрізняють ПР із малим (до 300 мм), середнім (до 1 000 мм) і великим ходом (понад 1 000 мм);

– *швидкість переміщень ланок маніпулятора* характеризує швидкодію, від якої залежить час обслуговування технологічного устаткування. Зазвичай швидкості лінійних переміщень робочих органів маніпуляторів не перевищують 1,0–1,5 м/с. Проте є окремі роботи зі швидкостями до 9 м/с. Швидкості кутових переміщень робочих органів переважно знаходяться в межах 0,25–6,3 рад/с, а також 15–360 град/с.

– *зона промислових робіт* – це простір, у якому може знаходитися робочий орган під час його функціонування і характеризується формою (або видом) і обсягом. Вид робочої зони обумовлений призначенням ПР і визначається числом ступенів рухливості маніпулятора, типом і взаємною орієнтацією кінематичних пар у просторі та відносними розмірами ланок маніпуляційної системи;

– *обсяг робочої зони* (або робочий об'єм) – це простір, у межах якого переміщується робочий орган ПР під час його функціонування. Вимірюється в (м^3) і визначає масштаб ручної праці доступної ПР. За величиною робочого обсягу роботи умовно поділяються на п'ять класів: мікророботи (4 %); міні-роботи (9 %); малі (30 %); середні промислові роботи (45 %); великі (12 %);

– *зона обслуговування*, у якій робочий орган виконує свої функції відповідно до його призначення і характеристик. За спільної роботи декількох ПР (робототехнічного комплексу) розглядається зона їхнього спільного обслуговування, яка є частиною простору;

– *похибка позиціювання, або відпрацювання траєкторії* – це відхилення фактичного положення (або траєкторії) робочого органу від заданого програмою позиціюванні (при багаторазовому повторенні руху), яке оцінюється в лінійних або кутових одиницях. Похибка позиціювання, або відпрацювання траєкторії може розглядатися як в цілому для робочого органу (сумарна), так і для окремих виконавчих механізмів ПР;

– *точність позиціювання* вказується в абсолютних одиницях. В основу визначення типу ПР за показником точності покладена відносна похибка позиціювання, або відпрацювання траєкторії;

– *відносна похибка позиціювання* – це величина, що характеризує точність робіт із цикловим і позиційним керуванням. Вона дорівнює відношенню абсолютної похибки позиціювання до максимального віддалення від осі найближчої до основи робота кінематичної пари (до кордону робочої зони) і виражена у відсотках (%);

Електромехатронні модулі, отримавши на вхід інформацію про подальше управління, виконують заданий функціональний рух із необхідними показниками якості. Апаратне об'єднання елементів в єдині конструктивні модулі обов'язково супроводжується розробкою інтегрованого програмного забезпечення.

Програмні засоби ЕМС забезпечують безпосередній перехід від задуму системи через її математичне моделювання до управління функціональним рухом у реальному часі.

Застосування електромехатронного підходу під час створення машин із комп'ютерним управлінням визначає їхні основні переваги порівняно з традиційними засобами автоматизації:

– відносно низьку вартість завдяки високому ступеню інтеграції, уніфікації та стандартизації всіх елементів і інтерфейсів;

– високу якість реалізації складних і точних рухів унаслідок застосування методів інтелектуального управління;

– високу надійність, довговічність і перешкодозахищеність;

- конструктивну компактність модулів (мініатюризація мікромашин);
- поліпшені вагогабаритні і динамічні характеристики машин унаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;
- можливості комплектування функціональних модулів в складні системи і комплекси під конкретні завдання замовника;
- поліпшені вагогабаритні і динамічні характеристики машин унаслідок спрощення кінематичних ланцюгів.

Загалом робототехнічну машину можна представити як технічну систему (рис. 4.6) [21].

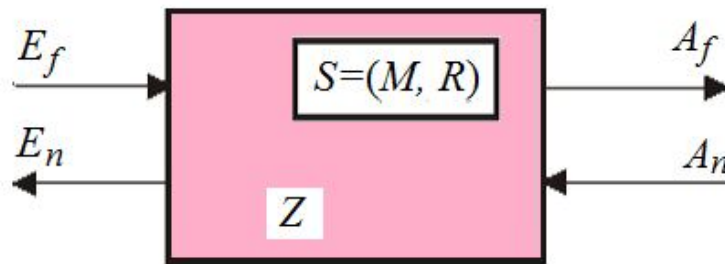


Рисунок 4.6 – Модель технічної системи робота [21]

Головні параметри моделі:

E_f , A_f – параметри, що характеризують функції системи;

E_n , A_n – параметри, які не відносяться до функцій приладу (умови роботи, зовнішні та додаткові впливи);

Z – системний оператор;

M – елементи системи;

R – відносини між елементами системи.

Така система обмежена областю реальної дійсності, а також взаємодіє з навколишнім середовищем (сукупність зовнішніх об'єктів, що взаємодіють з системою), виконує певні функції та має особливу структуру.

Функція властивості системи використовується для перетворення вхідних величин E_f , при зовнішніх і додаткових впливах A_n і умовах роботи E_n у вихідні величини A_f . Функція має властивість, яка характеризується параметрами системи. Кількість реалізованих системою функцій відповідає кількості використовуваних системою фізичних властивостей. Якщо система виконує декілька функцій, то розрізняють загальну і приватні функції.

Загальна функція охоплює безліч усіх вхідних і вихідних величин, яка характеризує розглянуту систему як одне ціле. Приватні функції поділяються на: основні допоміжні (за їхнім призначенням у виконанні завдання); основні і елементарні (за типом зміни функцій в процесі їхнього виконання).

Структура S – сукупність елементів M і відносин R між ними всередині системи $S = (M, R)$. Елемент системи під час проєктування розглядається, як одне ціле, хоча він може мати різний ступінь складності. Якщо під час розгляду елемента не береться до уваги його форма і внутрішня будова, а розглядається лише функція, що їм виконується, то такий елемент називається функціональним. Для механічної системи елементами можуть бути: деталь, ланка, група, вузол, простий або типовий механізм. Розглянемо особливості кожного елемента.

Деталь – елемент конструкції, що не має в своєму складі внутрішніх зв'язків (складається з одного твердого тіла).

Ланка – тверде тіло або система жорстко зв'язаних твердих тіл (може складатися з однієї або декількох деталей) входить до складу механізму.

Група – кінематичний ланцюг, що складається з рухомих ланок, пов'язаних між собою кінематичними парами (відносинами), і яка задовольняє деяким заданим умовам.

Вузол – кілька деталей пов'язаних між собою функціонально, конструктивно або в будь-який інший спосіб.

З погляду системи вузли, групи є простими або типовими механізмами, що розглядаються як підсистеми. Найнижчим рівнем розбиття системи під час конструювання є рівень деталей, а під час проєктування – рівень ланок. Елементи з системи можна виділити тільки після визначення взаємозв'язків між ними, які мають відносини. Для механічних систем відносини визначають структуру системи і її функції, а також її розташування і зв'язок.

Розташування – такі відносини між елементами, які характеризують їхні геометричні відносні положення.

Зв'язки – відносини між елементами, які призначені для передачі матеріалу, енергії або інформації між елементами. Зв'язки можуть здійснюватися за допомогою різних фізичних засобів: механічних з'єднань, рідин, електромагнітних або інших полів, пружних елементів. Механічні з'єднання можуть бути рухомими (кінематичні пари) і нерухомими. Нерухомі з'єднання розділяються на роз'ємні (гвинтові, штифтові) і нероз'ємні (зварні, клейові).

Значне місце у розташуванні елементів робототехнічних систем займає автоматизований електропривід, який використовується у всіх динамічних модулях.

Особливостями електроприводів ПР є:

- широкий діапазон регулювання по швидкості і позиціонуванню, високі вимоги щодо динаміки руху і точності стеження;
- робота в широкому діапазоні зміни моментів навантаження;

– тривала робота електродвигунів у загальмованому режимі.

Зазначена специфіка відноситься як до комплексу електроприводів ПР, так і до окремих електроприводів, схеми яких, по суті, розрізняються лише потужностями виконавчих і відповідно керуючих елементів. Загалом вони побудовані за загальною схемою (рис. 4.7).

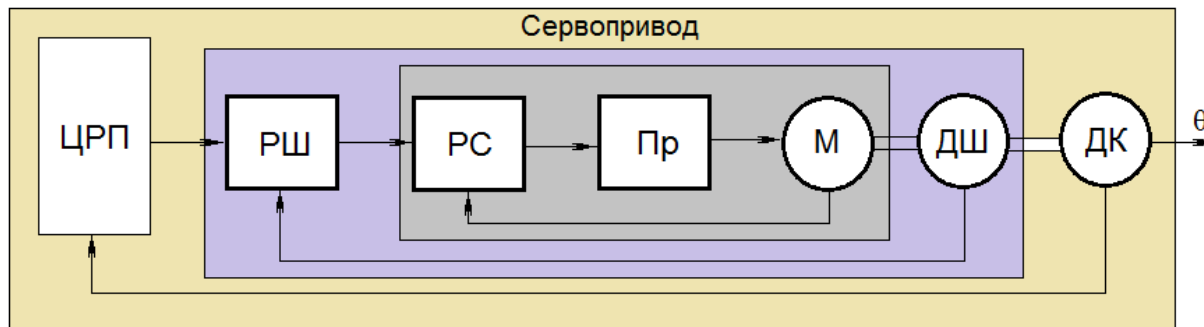


Рисунок 4.7 – Функціональна схема електроприводу
робототехнічної системи: ЦРП – цифровий регулятор положення;
РШ – регулятор швидкості; РС – регулятор струму; Пр – перетворювач;
М – двигун; ДШ – датчик швидкості; ДК – датчик кута.

Подана функціональна схема електроприводу представляє аналого-цифрову систему автоматичного керування, яка має три контури.

Перший контур утворений двигуном (М) із перетворювачем (Пр) і регулятором струму (РС). У другій контур входять, крім того, датчик швидкості (ДШ) і регулятор швидкості (РШ). У третій контур додатково входять датчик кута (ДК) і цифровий регулятор положення (ЦРП).

Очевидно, що в такій схемі поєднуються переваги комбінованої аналогової системи та цифрової (має високу точність цифрових датчиків, зручність програмування роботи тощо).

У сучасних приводних системах як регулятори струму та швидкості найчастіше використовуються аналогові операційні підсилювачі, за допомогою яких легко реалізується необхідний закон керування. Датчик швидкості може бути як аналоговим, так і цифровим. У низці випадків застосування датчика швидкості взагалі недоцільно, оскільки сигнал про зміну швидкості може бути обчислений у цифровому регуляторі положення шляхом диференціювання сигналу з датчика кута.

Загалом, незалежно від конкретної схеми електропривід ПР складається з таких елементів:

- виконавчого елемента (електродвигуна);
- перетворювача;
- датчиків зворотного зв'язку по струму, швидкості та кута;

– регуляторів струму, швидкості та кута (положення).

Аналіз сучасних тенденцій у виробництві електроприводів вітчизняними і зарубіжними фірмами показує, що більшість із них випускається як сервоприводи, що конструктивно об'єднують двигун, перетворювач, датчики і регулятори швидкості та струму.

Такі інтелектуальні пристрої використовуються у ПР (рис. 4.8), які є універсальними засобами автоматизації виробничих процесів в умовах великої номенклатури та частої зміни виробів [22].

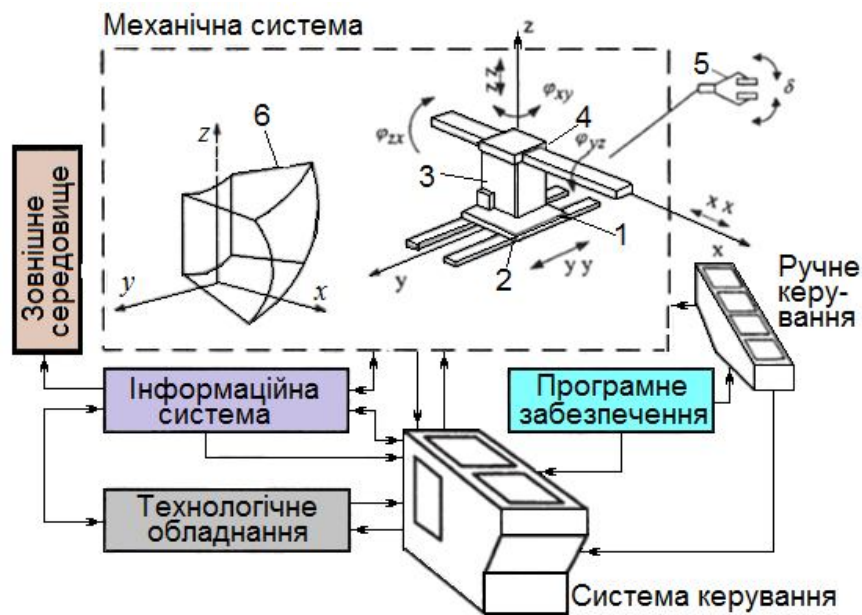


Рисунок 4.8 – Структурна схема промислового робота

1 – шляхопровід; 2 – підстава; 3 – корпус; 4 – маніпулятор;
5 – захватний пристрій; 6 – робоча зона і система координат основних рухів ПР; xx – напрямок руху маніпулятора уздовж поздовжньої осі; yy – напрямки руху корпусу робота по шляхопроводу; zz – напрямки руху маніпулятора вгору-вниз; ϕ_{zx} – кут повороту корпусу робота навколо вертикальної осі, ϕ_{yz} – кут повороту руки в вертикальній площині; ϕ_{xy} – кут повороту щодо осі xx , δ – напрямки руху захоплення деталі [22]

Особливістю ПР є виконання як основних технологічних операцій, так і допоміжних операцій з обслуговування технологічного обладнання.

Під час обслуговування основного технологічного обладнання ПР здійснюють операції завантаження і розвантаження деталей, контроль, зміни інструментів, прибирання відходів, установки і зміни засобів контролю в автоматичному режимі. Широко поширене застосування ПР для обслуговування складського обладнання. У транспортних системах ПР можуть виконувати самостійні операції із переміщення і накопичення вантажів, а також з обслуговування конвеєрних ліній.

У склад ПР входять пристрої програмного керування та *маніпулятори*, що становлять сукупність просторових важільних механізмів та системи приводів. Такі маніпулятори виконують антропоморфні дії (маніпуляції, що аналогічні діям руки людині) під керуванням програмного автоматичного пристрою або людини-оператора.

Розглянемо як приклад структурну і функціональну схеми ПР з трирухливим маніпулятором. Основний механізм руки маніпулятора складається з нерухомої ланки 0 і трьох рухомих ланок 1, 2, 3 (рис. 4.9) [22, 23].

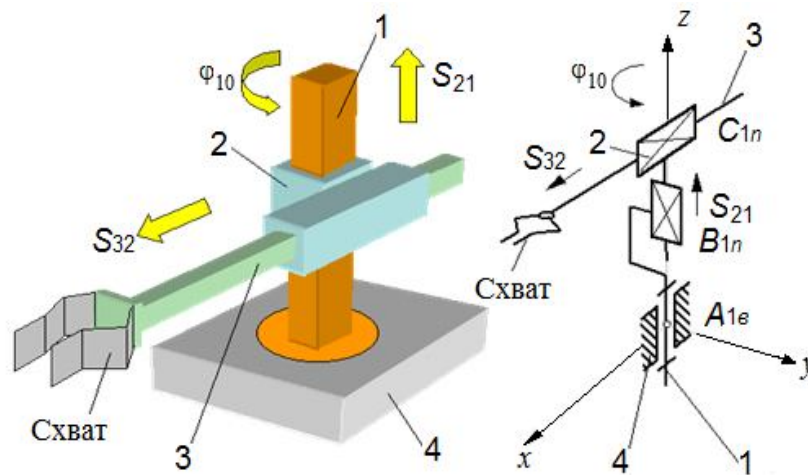


Рисунок 4.9 – Принципова і структурна схеми промислового робота:
1, 2, 3 – рухомі ланки маніпулятора, 4 – нерухома основа

Механізм такого маніпулятора відповідає циліндричній системі координат. У цій системі ланка (1) може обертатися щодо ланки (0) (відносно кутового переміщення φ_{10}), ланка (2) переміщується по вертикалі щодо ланки (1) (відносно лінійне переміщення S_{21}).

Ланка (3) переміщується в горизонтальній площині щодо ланки (2) (відносно лінійне переміщення S_{32}). На кінці ланки (3) укріплено захватний пристрій, або захват, призначений для захоплення і утримання об'єкта маніпулювання під час роботи маніпулятора. Ланки основного важеля механізму маніпулятора утворюють між собою три однорухливі кінематичні пари (одна обертальна A і дві поступальні B і C). Вони можуть забезпечити переміщення об'єкта в просторі без управління його орієнтацією.

Для виконання кожного з трьох відносних рухів маніпулятор оснащений приводами, які складаються з двигунів із редуктором і системи датчиків зворотнього зв'язку. Оскільки рух об'єкта здійснюється за заданим законом руху, то в системі є пристрої, що зберігають і задають програму руху (програмоносії).

Наприклад, система управління (рис. 4.10) відповідно до заданої програми формує і видає сигнал u_{ipr} на виконавчі пристрої приводів.

У системі керування електроприводу сигнали формуються і перерозподіляються (u_1 – u_3) та надходять на двигуни М1–М3.

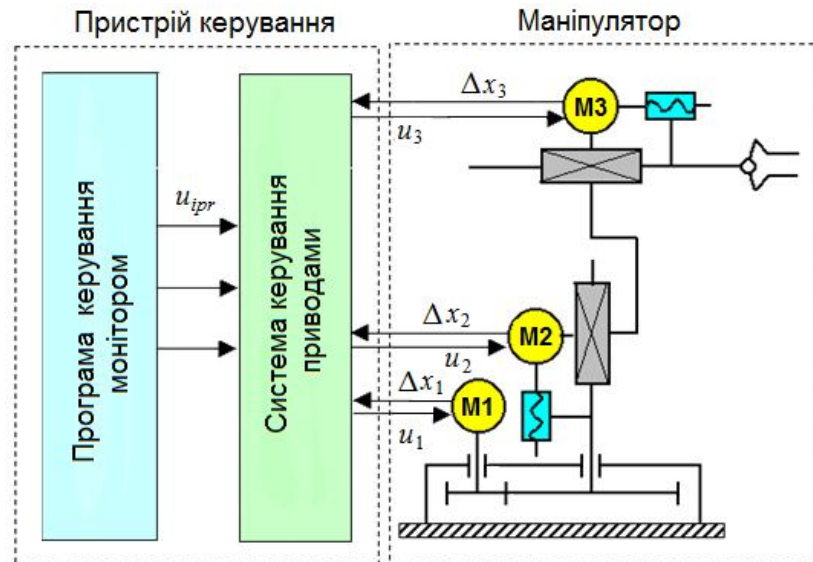


Рисунок 4.10 – Функціональна схема промислового робота

За необхідності система коригує дії, якщо отримуються сигнали з датчиків зворотнього зв'язку Δx_1 – Δx_3 .

Широко поширилися розробки модульних роботів, які становлять сукупність системи конструктивних модулів. Під конструктивним модулем розуміють функціонально і конструктивно незалежну одиницю, яку можна використовувати індивідуально і в різних комбінаціях з іншими модулями. Кожен модуль – це закінчений машинний агрегат, що містить як звичайні приводні засоби і механізми, так і енергетичні та інформаційні комунікації, що забезпечують одну або кілька ступенів рухливості робота.

Наприклад, ПР має систему основних модулів (рис. 4.11), яка складається з: двох модулів міжпозиційних переміщень та шість модулів, які здійснюють орієнтування руху.

Крім основних модулів, у систему входять операційні елементи руху, а також модуль нерухомої основи. До модулів міжпозиційних переміщень входять два модуль рухомої основи: у підлоговому і в підвісному виконанні.

Модулі рухів перенесення мають три модуля прямолінійних переміщень, а саме: два одно координатних (для обертальних переміщень) і один двокоординатний модуль (для подвійного гойдання).

Модулі прямолінійних переміщень мають елементи:

- поперечного зсуву, який може встановлюватися на модуль повороту, або на модуль нерухомої основи;
- підйому, які можуть встановлюватися на модулі нерухомої і рухомої (підлоговий варіант) основи, а також на модулі поперечного зсуву і повороту;



Рисунок 4.11 – Робота системи модулів та основні елементи руху

– радіального ходу, що використовується для прямолінійного переміщення руки робота, який може встановлюватися на всі згадані раніше модулі.

До елементів модулів руху належать механізми: двигуни, перетворювачі, гальмівні, люфтовибіркові та інші, які мають конструктивні елементи, що показано на рисунку 4.11.

Робота модулів керується головним комп'ютером. Необхідна або задана інформація передається на модулі, які мають різний рух у системі координат. Від руху модулів відбувається технологічна дія робочого органу, завдяки якому відбувається технологічний процес.

Отже, робота промислових роботів залежить від виконавчих функцій модулів та робочих органів. Усе це впливає на виконання та якість технологічного процесу.

4.3 Кінематичні характеристики промислових роботів

Будова структурної схеми ПР, що містить інформацію про кількість його рухомих частин, представляється у вигляді кінематичних пар і їх орієнтацій щодо осей базової системи координат (пов'язаної з нерухомою ланкою).

Рухи, які забезпечуються ПР, поділяються на:

- глобальні (для роботів із рухомою основою), у яких рух маніпулятора істотно перевищує розміри механізму;
- регіональні (транспортні), у якому рух, що забезпечуються першими трьома ланками маніпулятора або його «рукою», величина яких порівняна з розмірами механізму;
- локальні (орієнтувальні), у яких рух забезпечується ланками маніпулятора, що утворюють його «кистю руки» і величина яких значно менше розмірів механізму.

Відповідно до цієї класифікації рухів у ПР можна виділити дві ділянки кінематичного ланцюга з різними функціями: механізм «руки» і механізм «кисті». Під «рукою» розуміють ту частину механізму ПР, яка забезпечує переміщення центру захвату (рис. 4.12, точки М - регіональний рух захвату). Під «кистю руки» розуміються ті ланки і пари, які забезпечують орієнтацію захвату (локальні рухи захвату).

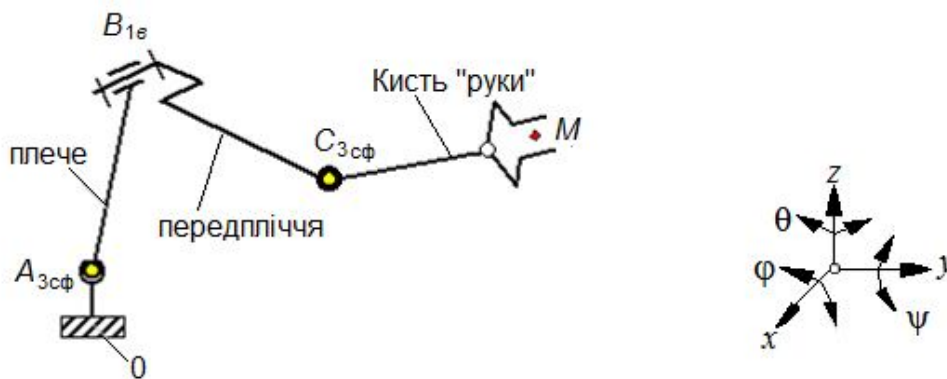


Рисунок 4.12 – Кінематична схема антропоморфного маніпулятора

Наприклад, розглянемо структурну схему антропоморфного маніпулятора, яка в першому наближенні відповідає механізму руки людини (див. рис. 4.12). Цей механізм складається з трьох рухомих ланок і трьох кінематичних пар, а саме: двох трирухомих сферичних $A_{3сф}$ і $C_{3сф}$ та однієї однорухомої обертальної $B_{1в}$.

Кінематичні пари маніпулятора (КПМ) характеризуються:

- ім'ям або позначенням КП (велика літера латинського алфавіту: А, В, С і тощо);
- ланками, які утворюють пару (0/1, 1/2 тощо);
- відносним рухом ланок у парі (для однорухомих пар – обертальний, поступальний і гвинтовий);
- рухливістю КППМ (для нижчих пар від 1 до 3, для вищих пар від 4 до 5);
- віссю орієнтації КППМ щодо осей базової або локальної системи координат.

Робочий простір маніпулятора – це частина простору, що обмежена поверхнями, які огинають до безлічі можливих положень його ланок.

Зона обслуговування маніпулятора – це частина простору, що відповідає безлічі можливих положень центру захвату маніпулятора. Зона обслуговування є важливою характеристикою маніпулятора. Вона визначається структурою і системою координат руки маніпулятора, а також конструктивними обмеженнями, накладеними на відносні переміщення ланок у КППМ.

Рухливість маніпулятора – це число W незалежних узагальнених координат, що однозначно визначає положення захвату в просторі.

Маневреність маніпулятора – це точка M рухливості маніпулятора у фіксованому (нерухомому) захваті.

Можливість зміни орієнтації захвату при розміщенні його центру в заданій точці зони обслуговування характеризується коефіцієнтом сервісу ($k_y = y/4p$), відносна величина якого залежить від кута сервісу – y . Завдяки у фіксується центр захвату в заданій точці зони обслуговування і визначається положення останньої ланки маніпулятора.

За структурного синтезу механізму маніпулятора необхідно враховувати:

- кінематичні пари маніпуляторів забезпечуються електроприводами, які мають двигуни і гальмівні пристрої. Тому в схемах маніпуляторів зазвичай використовуються однорухомі кінематичні пари (обертальні або поступальні);
- необхідно забезпечити не тільки задану рухливість захвату маніпулятора, але і таку орієнтацію вісей кінематичних пар, яка б забезпечувала необхідну форму зони обслуговування, а також простоту і зручність програмування його рухів;
- при виборі орієнтації кінематичних пар необхідно враховувати розташування приводів (на підставі або на рухомих ланках), а також спосіб врівноваження сил ваги ланок.

У математиці положення точки в просторі задається в одній з трьох систем координат:

- прямокутної декартової з координатами x_M, y_M, z_M ;
- циліндричної з координатами r_{sM}, j_M, z_M ;
- сферичної з координатами r_M, j_M, φ_M .

Відповідно для позиціонування об'єкта в просторі конструкція маніпулятора відповідає одній з наведених нижче схем (рис. 4.13) або їхній комбінації.

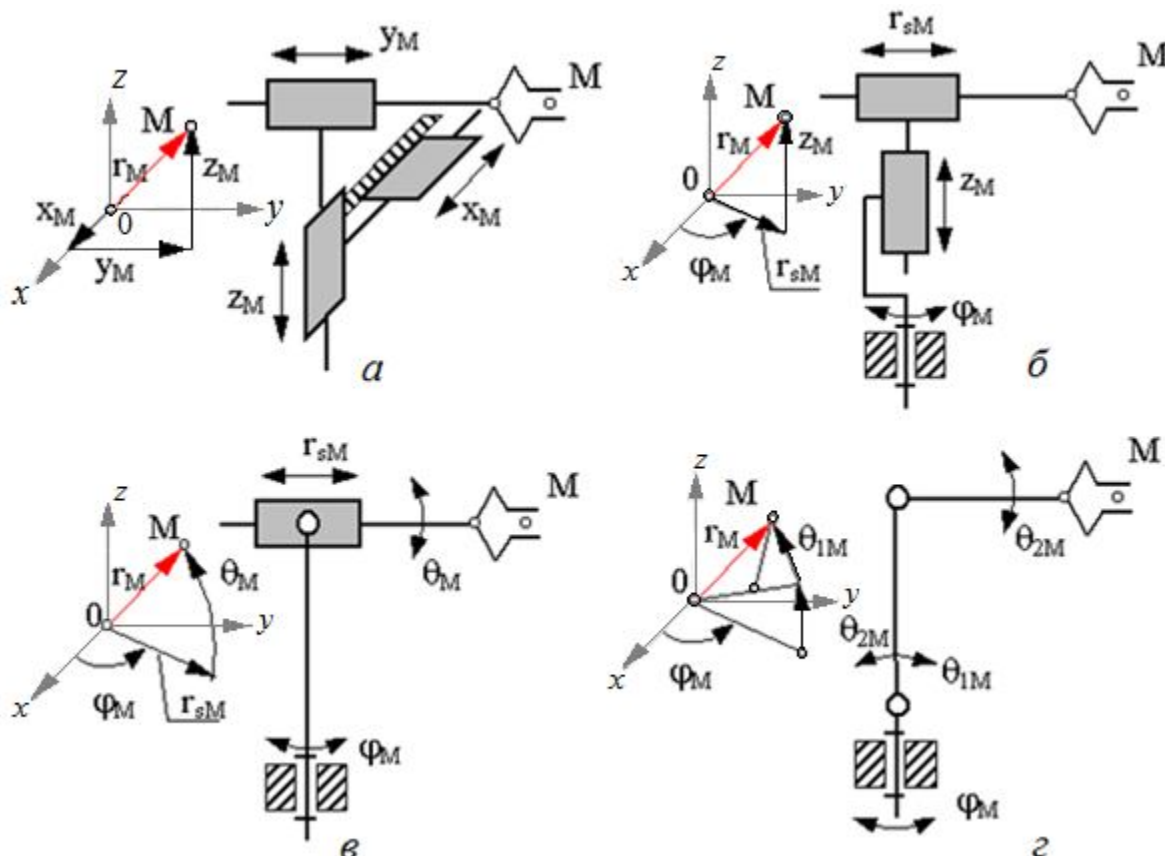


Рисунок 4.13 – Системи координат «руки» маніпулятора:
 а – прямокутна (декартова), б – циліндрична, в – сферична,
 г – кутова (ангулярна)

Якщо рух пальців «руки» враховувати тільки в одному злитому русі охоплення, то рука людини має 12 ступенів рухливості. У маніпуляторах відтворення властивостей руки людини досягається за ступенем рухливості маніпулятора, що дорівнює 7. Це за умови, що кінцева ланка маніпулятора, яка здійснює захоплення предмета, має можливість повнообертальної дії.

Структура маніпулятора визначається також місцем розміщення приводів. Якщо приводи розміщуються безпосередньо в кінематичних парах, то до мас рухомих ланок маніпулятора додаються маси приводів. Сумарне

навантаження на приводи та їхня потужність збільшуються, а відношення маси маніпулятора до корисного навантаження (максимальної маси об'єкта маніпулювання) зменшується.

Тому під час проектування роботів приводи ланок «руки», як найбільш потужні, і мають більшу масу.

Такі приводи розміщуються ближче до основи робота. Для передачі руху від приводу до ланки використовуються додаткові кінематичні ланцюги.

Важлива особливість маніпуляторів – зміна структури механізму в процесі роботи. Відповідно до циклограми, або технологічної програми, деякі кінематичні пари мають гальмівні пристрої. Дві ланки механізму жорстко з'єднуються одна з одною, утворюючи одну ланку. Зі структурної схеми механізму виключаються одна кінематична пара і одна ланка, а кількість рухомостей захвата механізму зменшується (зазвичай на одиницю). Змінюється структура механізму і в тих випадках, коли в процесі виконання робочих операцій (наприклад, при складанні або зварюванні) захват з об'єктом маніпулювання стикається з навколишніми предметами, утворюючи з ними кінематичні пари. Кінематичний ланцюг механізму замикається, а кількість рухомостей зменшується. У цьому випадку в ланцюзі можуть виникати надлишкові зв'язки. Ці структурні особливості маніпуляторів необхідно враховувати під час програмування промислового робота.

Вид руху «руки» маніпулятора визначається розмірами зони, яка під час виконання основного робочого руху повинна залишатися вільною. Перешкоди в цій зоні мають бути відсутніми. Для обслуговування технологічного обладнання з вузькою робочою зоною (наприклад, пресів, нагрівальних печей та ін.) кращими є схеми з одним поступальним ступенем рухливості (наприклад, з висувною «рукою»), оскільки при русі вільної руки з поворотами повинна залишатися зона набагато ширша.

4.4 Функції та положення комплексних пар механізму маніпулятора

При визначенні функцій положення механізму маніпулятора ставляться задачі на базі загальних методів дослідження структури, геометрії, кінематики та динаміки систем із просторовими багаторухомими механізмами.

До основних завдань механіки маніпуляторів належать:

- розробка методів синтезу та аналізу виконавчих механізмів (включаючи механізми приводів);

- програмування руху маніпулятора;
- розрахунок керуючих зусиль і реакцій в КІМ;
- урівноваження механізмів маніпуляторів.

Кожна з розглянутих задач може бути сформульована як пряма (завдання аналізу) або як зворотна (завдання синтезу).

У прямій задачі знаходять закон зміни абсолютних координат вихідної ланки по заданих законах зміни відносних або абсолютних координат ланок.

Зворотне завдання динаміки полягає у визначенні закону зміни керуючих сил і моментів у приводах, що забезпечують заданий закон руху вихідної ланки. Наприклад, по заданому закону руху захвата знаходять закони зміни координат ланок, зазвичай лінійних або кутових переміщень у приводах.

Розв'язання зворотної задачі, або завдання синтезу, більш складне, тому що часто вона має безліч припустимих рішень, з яких необхідно вибрати оптимальне. У зворотній задачі кінематики за необхідним законом зміни швидкостей і прискорень вихідної ланки визначаються відповідні закони зміни швидкостей і прискорень у приводах маніпулятора.

Розглянемо основну задачу кінематики – визначення функції положення механізму маніпулятора. Для просторових механізмів найбільш ефективними методами вирішення цього завдання є векторний метод і метод перетворення координат. Для розв'язання прямої задачі про становище захвата маніпулятора зазвичай використовують метод перетворення координат. Із безлічі методів перетворення координат, які відрізняються один від одного правилами вибору осей локальних систем координат, для маніпуляторів зазвичай використовується метод Денавіта і Хартенберга [23-26].

У прямій задачі визначається положення вихідної ланки як функція переміщень у приводах модуля.

У зворотній – задане положення вихідної ланки представлено як функція переміщень у приводах модуля. Вибір розташування і орієнтації локальних систем координат забезпечується виконанням цих завдань. Під час використання методу [23-25] осі координат розташовуються за такими правилами (рис. 4.14):

1. Для ланки i вісь z_i направлена по осі кінематичної пари, яка утворюється з ланкою $(i + 1)$. Початок координат розміщують у геометричному центрі цієї пари.

2. Вісь x_i направлена за загальним перпендикуляром до вісей z_{i-1} і z_i з направленням від z_{i-1} до z_i . Якщо вісі z_{i-1} і z_i збігаються, то x_i перпендикулярна до них і спрямована довільно.

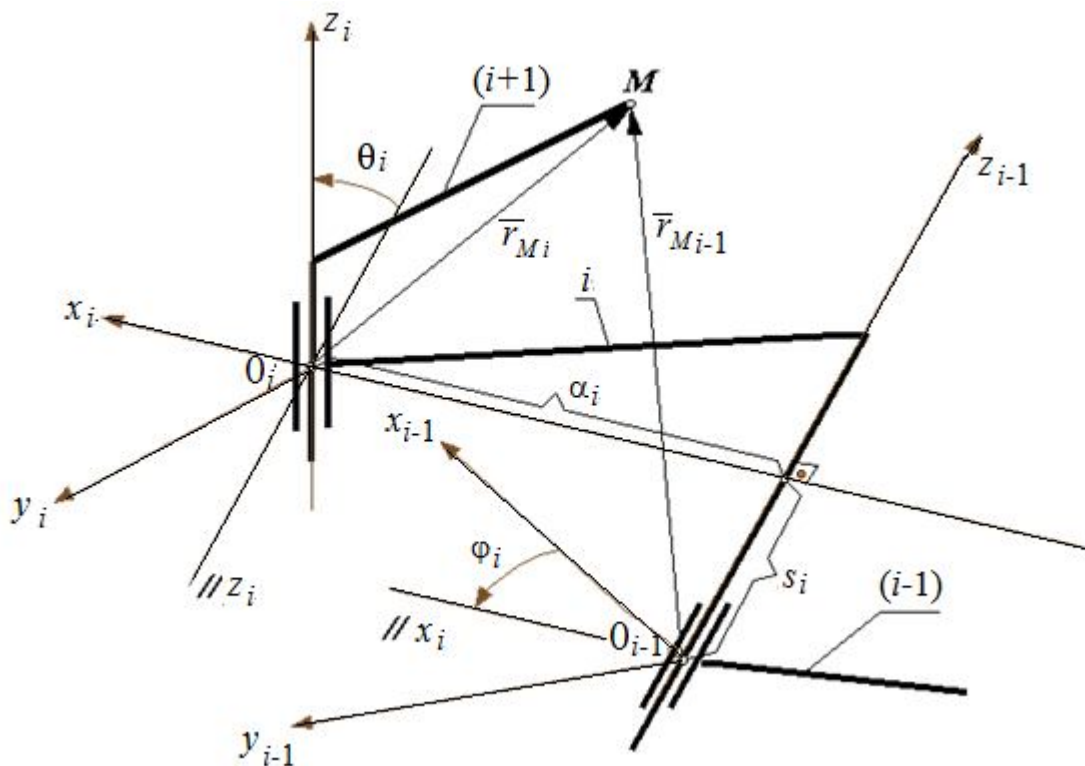


Рисунок 4.14 – Перехід з системи координат ланки i в систему координат ланки $i-1$ [23-25]

Якщо вісі перетинаються в центрі кінематичної пари, то початок координат розташовується в точці перетину, а вісь x_i направляється за правилом векторного помноження $\overline{x_i} = \overline{z_i} \times \overline{z_{i-1}}$ (найкоротший поворот осі z_i до суміщення з z_{i-1} при спостереженні з кінця x_i повинен відбуватися проти годинникової стрілки).

3. Вісь y_i направлена так, щоб система координат вважалася правою.

У цьому випадку в прямій задачі необхідно визначити положення затискача маніпулятора і пов'язаної з ним системи координат $M(x_n y_n z_n)$ відносно нерухомої, або базової системи координат $K(x_0 y_0 z_0)$.

Це здійснюється послідовними переходами з системи координат ланки i в систему координат ланки $i-1$. Відповідно до прийнятого методу кожен перехід має послідовність чотирьох рухів – двох поворотів і двох паралельних переносів, що здійснюються у зазначеній послідовності:

- поворот i -ї системи навколо осі x_i відбувається на кут $-q_i$ до паралельності вісей z_i і z_{i-1} (позитивний напрямок повороту при спостереженні з кінця вектора x_i проти годинникової стрілки);

- перенесення вздовж осі x_i на величину $-a_i$ до суміщення початку системи координат O_i з точкою перетину осей x_i і z_{i-1} (відлік по висі x_i від точки перетину висі x_i і висі z_{i-1});

– перенесення вздовж висі $z_i - 1$ на величину $-s_i$, після якого початок системи координат O_i виявляється на початку координат $O_i - 1$ системи $i - 1$ (відраховується по осі $z_i - 1$ від її початку координат $O_i - 1$ до точки її перетину з віссю x_i);

– поворот навколо осі $z_i - 1$ на кут $-j_i$ до того моменту, поки вісь x_i не стане паралельною осі $x_i - 1$ (позитивний напрямок повороту при спостереженні з кінця вектора $z_i - 1$ проти годинникової стрілки).

Необхідно відзначити, що знак кута повороту не має значення, тому що в матрицях переходу використовуються напрямні косинуси (парні функції). Доцільно розглядати кут, що забезпечує найкоротший поворот осі старої системи i до сполучення (паралельності) з відповідною віссю нової ($i-1$). Переміщення початку координат визначаються як координати початку старої системи O_i , так і в новій $O_i - 1$.

У маніпуляторах зазвичай використовуються однорухомі кінематичні пари (обертальні, або поступальні). Обидва відносних рухів, як обертальний, так і поступальний, реалізуються в циліндричних парах. Тому при загальному поданні механізму використовуються (див. рис. 4.11) циліндричні пари.

Матриці переходу системи O_i в систему $O_i - 1$:

$$M_i = M_i^\theta \cdot M_i^\alpha \cdot M_i^S \cdot M_i^\phi, \quad (4.1)$$

де M_i^θ – матриця повороту навколо осі x_i на кут $-q_i$;

M_i^α – матриця переносу вздовж осі x_i на $-a_i$;

$$M_i^\theta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad M_i^\alpha = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

M_i^S – матриця переносу вздовж осі $z_i - 1$ на $-s_i$;

M_i^ϕ – матриця повороту навколо осі $z_i - 1$ на кут $-\phi_i$.

$$M_i^s = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad M_i^\varphi = \begin{vmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 & 0 \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

У цих матрицях змінні s_i і j_i відповідають відносним переміщенням ланок у кінематичних парах i . Вони є узагальненими координатами маніпулятора, що визначають конфігурацію механізму в розглянутому положенні. Змінні a_i і q_i визначаються конструктивним виконанням ланок маніпулятора, які в процесі руху залишаються незмінними.

Положення деякої довільної точки M у системі координат ланки i визначається вектором r_{Mi} , а в системі координат ланки $(i-1)$ – вектором r_{Mi-1} . Ці радіуси пов'язані між собою через матрицю перетворення координат M_i таким рівнянням:

$$\bar{r}_{M_{i-1}} = M_i \cdot \bar{r}_{M_i}, \quad (4.4)$$

де M_i – матриця переходу з i -ї системи координат у $(i-1)$:

$$M_i = \begin{vmatrix} \cos\varphi_i & -\cos\theta_i \sin\varphi_i & \sin\varphi_i \cdot \sin\theta_i & \alpha_i \cdot \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\theta_i \cdot \cos\varphi_i & -\cos\varphi_i \cdot \sin\theta_i & \alpha_i \sin\varphi_i \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4.5)$$

Розглянемо маніпулятор, що має 6 положень рухів у вихідному або початковому положенні (рис. 4.15). За початкове положення приймаються все відносні узагальнені координати, що дорівнюють нулю. Перехід з системи координат будь-якої i -ї ланки до нерухомої або базової системи записується у вигляді [23-26]:

$$\bar{r}_{M0} = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_i \cdot \bar{r}_{Mi} \quad \text{або} \quad \bar{r}_{M0} = T_i \cdot \bar{r}_{Mi} \quad (4.6)$$

де T_i – матриця перетворення координат i -ї системи в координати базової системи.

$$T_i = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_i \quad (4.7)$$

Для схеми, зображеної на рисунку 4.12, радіус $r_{M6} = 0$, а радіус r_{M0} визначиться за формулою:

$$\bar{r}_{M0} = T_n = T_6 \quad (4.8)$$

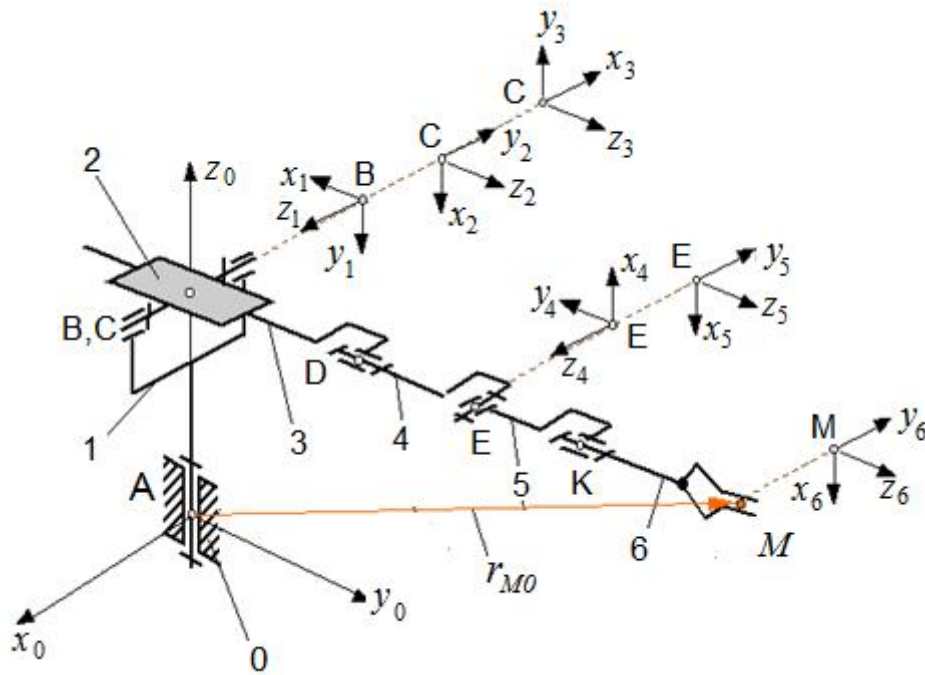


Рисунок 4.15 – Маніпулятор: з положеннями руху ($x_1-x_6; y_1-y_6; z_1-z_6$) модулів (В, С, D, Е, К) із ланками (1–6); А ($x_0; y_0; z_0$) модуль основи нерухомий; r_{M0} – перехід із системи координат будь-якої i -ї ланки [23-26]

Фактично положення вихідної ланки маніпулятора визначається матрицею T_n .

$$T_n = \begin{vmatrix} (\bar{O} \times \bar{A})_x & O_x & A_x & r_n M_x \\ (\bar{O} \times \bar{A})_y & O_y & A_y & r_n M_y \\ (\bar{O} \times \bar{A})_z & O_z & A_z & r_n M_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.9)$$

Елементи цієї матриці визначають положення центра захоплення точки M і орієнтацію його в просторі. Четвертий стовпець визначає декартові координати точки M (проекції вектора r_{M0} на осі координат). Третій стовпець містить напрямні косинуси осі z_n системи координат, пов'язаної із захопленням, або вектора підходу, який характеризує напрямок губок захвата (рис. 4.16).

Другий стовпець визначає напрямок осі y_n або вектора орієнтації \bar{O} , який проходить через центр захоплення по осі, що перпендикулярна робочим поверхням його губок. У першому стовпчику є напрямні косинуси осі x_n або вектора $(\bar{O} \times \bar{A})$.

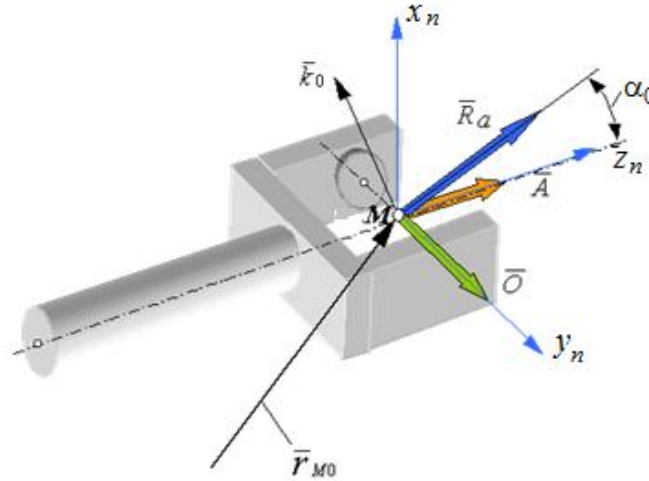


Рисунок 4.16 – Орієнтація затискача маніпулятора [23–26]

Кутом підходу за α називається кут між вектором підходу \bar{A} і базовим вектором: $R_\alpha = \bar{O} \times \bar{k}_0$ (де \bar{k}_0 – орт вектора нерухомої або базової частини).

У результаті матричних перетворень отримується радіус-вектор точки M захвата у функції узагальнених координат. Зазвичай за узагальнені координати приймають лінійні і кутові переміщення в кінематичних парах або на вихідних валах приводів маніпулятора. У механізмі з n рухомостями в загальному вигляді функцію положення затискача можна записати як:

$$\bar{r}_{OM} = T_n \cdot \bar{A} = \bar{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (4.10)$$

де q_1, q_2, \dots, q_n – узагальнені координати маніпулятора.

Рішення прямої задачі кінематики для точки M затискача можна отримати шляхом диференціювання четвертого стовпця матриці T_n за часом:

$$r_{nM} = \begin{bmatrix} r_{nMx} \\ r_{nMy} \\ r_{nMz} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad V_{nM} = \frac{dr_{nM}}{dt} = \begin{bmatrix} V_{nMx} \\ V_{nMy} \\ V_{nMz} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \alpha_{nM} = \frac{d^2 r_{nM}}{dt^2} = \begin{bmatrix} \alpha_{nMx} \\ \alpha_{nMy} \\ \alpha_{nMz} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Кутову швидкість ($\bar{\omega}_n$) і кутове прискорення (α_{nM}) затискача можна визначити векторним підсумовуванням відносних кутових швидкостей у обертових КПМ механізму. Якщо вектори кутових швидкостей за цього вибору орієнтації осей координат збігаються з віссю z , то кутова швидкість затискача

$$\bar{\omega}_n = \sum_{i=1}^m \bar{k}_{i-1} \cdot \omega_{i,i-1}, \quad (4.12)$$

де \bar{k}_{i-1} – орт осі z системи координат, розташованої в центрі КППМ, що з'єднує ланку i та ланку $i-1$;

m – число обертальних КППМ у механізмі.

Диференціюючи (4.12) по часу, отримується формула для визначення кутового прискорення захвата:

$$\bar{\varepsilon}_n = \sum_{i=1}^m \bar{k}_{i-1} \cdot \varepsilon_{i,i-1} + \sum_{j=2}^m \left[\left(\sum_{k=i-1}^{m-1} \bar{k}_{i-1} \cdot \omega_k \right) \times (\bar{k}_{j-1} \cdot \omega_j) \right] \quad (4.13)$$

Отже, при кінематичному аналізі маніпулятора в прямій задачі необхідно визначити лінійні і кутові швидкості та прискорення захвата при заданих значеннях (зазвичай відносних швидкостей і прискореннях у кінематичних парах механізму). У зворотній задачі по заданому закону зміни швидкостей і прискорень захвата визначаються закони зміни швидкостей і прискорень у КППМ або на вихідних ланках приводів.

4.5 Динамічні параметри маніпулятора під час навантаження та основні елементи

З великої різноманітності завдань динаміки маніпуляторів основними є силовий розрахунок і швидкодії ПР.

При силовому розрахунку маніпуляторів вирішуються завдання:

- визначення зовнішніх силових дій, що управляють та забезпечують необхідний закон руху механізму;
- розрахунку реакцій в кінематичних парах.

Перша частина називається завданням синтезу управління. При силовому розрахунку зазвичай застосовується метод кінетостатики, заснований на принципі Д'Аламбера. Відповідно до методу додаються до зовнішніх сил і моментів ланок механізму розрахункові сили інерції. Вони забезпечують врівноваженість системи і дозволяють розглядати рухливу систему в квазістатичному урівноваженні (умовно нерухому). Силовий розрахунок виконується при заданому корисному навантаженні \bar{F}_n , відомих законах руху ланок $\bar{\alpha}_{si}$ та $\bar{\varepsilon}_{si}$ і відомих інерційних характеристик ланок (маси m_i та їх моментів інерції J_{si}).

За цими даними визначаються головні вектори $\bar{F}_{ui} = -m \cdot \bar{\alpha}_{si}$ і головні моменти $\bar{M}_{ui} = -J_{si} \cdot \bar{\varepsilon}_i$ сил інерції для кожної з ланок механізму. Для відкритого кінематичного ланцюга рішення починається з вихідної ланки –

захвату. Відкинуті зв'язки ланки n з ланкою $n-1$ і вихідним валом приводу ланки n замінюються реакціями $\overline{M}_{n,n-1}$ і $\overline{F}_{n,n-1}$ та складаються кінетостатичні векторні рівняння рівноваги сил і моментів для ланки n (рис. 4.17):

$$\overline{G}_0 + \overline{G}_n + \overline{F}_{un} + \overline{F}_{uo} + \overline{F}_{n,n-1} + \overline{F}_n = 0 \quad (4.14)$$

$$\overline{M}(\overline{G}_n) + \overline{M}(\overline{G}_o) + \overline{M}(\overline{F}_{un}) + \overline{M}(\overline{F}_{uo}) + \overline{M}_{un} + \overline{M}_{n,n-1} + \overline{M}(\overline{F}_n) = 0 \quad (4.15)$$

де $\overline{M}_{n,n-1}$ – проєкція вектора моменту в кінематичній парі на вісь z , яка є рушійним моментом приводу в КП, тобто:

$$\overline{M}_{z,(n,n-1)} = \overline{M}_{\partial(n,n-1)} \quad (4.16)$$

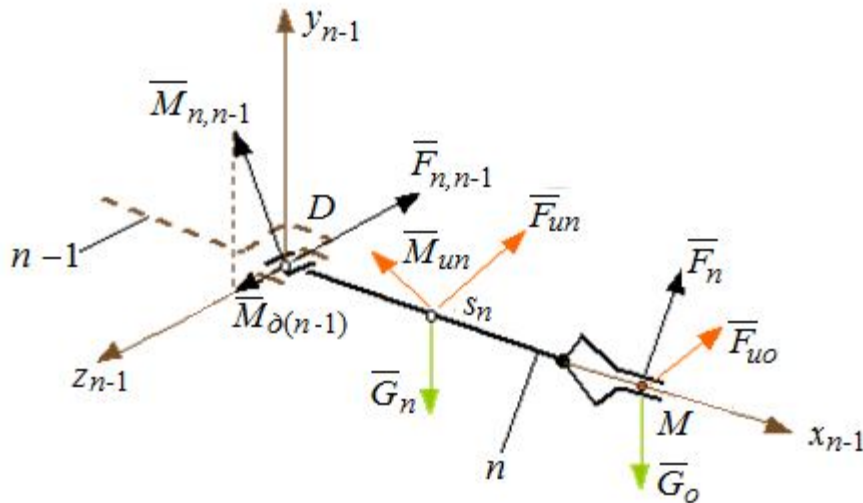


Рисунок 4.17 – Схема силового розрахунку маніпулятора [23-26]

Проектуючи векторні рівняння на осі координат, отримується система алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} &F_{x(n,n-1)}, F_{y(n,n-1)}, F_{z(n,n-1)}; \\ &M_{x(n,n-1)}, M_{y(n,n-1)}, M_{z(n,n-1)} = M_{\partial(n,n-1)} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Для розглядання рівноваги ланки $n-1$ у місці її приєднання прикладаються реакції з боку ланки n :

$$\begin{aligned} &F_{x(n-1,n)}, F_{y(n-1,n)}, F_{z(n-1,n)}; \\ &M_{x(n-1,n)}, M_{y(n-1,n)}, M_{z(n-1,n)} = M_{\partial(n-1,n)}, \end{aligned} \quad (4.18)$$

які рівні за величиною і протилежні по напрямку реакцій. Так послідовно складаються рівняння силової рівноваги для всіх n ланок механізму. З рішення системи рівнянь визначаються реакції в кінематичних парах, рушійні сили і моменти.

У більшості кінематичних схем маніпуляторів електроприводи сприймають статичні навантаження від сил ваги ланок. Це вимагає значного збільшення потужностей двигунів електроприводів і моментів гальмівних пристроїв. Для боротьби з цим використовують три методи:

- визначення кінематичних схем маніпуляторів, у яких сили ваги ланок сприймаються підшипниками кінематичних пар. На потужність приводів і гальмівних пристроїв за такого рішення сили ваги впливають тільки через сили тертя в кінематичних парах. Недоліком цього методу є великі осьові навантаження в підшипниках;

- урівноваження ланок маніпулятора за допомогою коригування їхньої маси. Водночас цьому центр мас ланки за допомогою коригувальних мас зміщується в центр кінематичної пари. Недоліком цього методу є значне збільшення маси маніпулятора і моментів інерції його ланок;

- урівноваження сил ваги ланок маніпулятора за допомогою пружних вивантажувачів, або рівнозважувачів. Ці пристрої не дозволяють забезпечити повне розвантаження приводів від дії сил ваги на всьому відносному переміщенні ланок. Тому конструкція їх має кулачкові або важельні механізми, які узгоджують характеристику пружини з характеристикою сил ваги ланок.

На рисунку 4.18 подана схема виробничого робота, у якому привід вертикального переміщення руки забезпечений механізмом для силового розвантаження. Він складається з пружини і кулачкового механізму з профілем, виконаним по спіралі Архімеда.

Відповідно до призначення ПР у технологічному процесі кінцеві ланки маніпуляторів забезпечуються різного роду робочими органами: затискальними пристроями, що забезпечують взяття й утримання об'єктів маніпулювання; технологічними інструментами, за допомогою яких виконуються основні технологічні операції.

Для завантаження металообробних верстатів зазвичай, використовуються механічні затискні пристрої. Ці пристрої виконують функції орієнтації, центрування предмета обробки, закріплення заготовки.

Механічні захоплювальні пристрої (захвати) мають приводний пристрій, механізм затиску і захоплювальні елементи (губки захвата). За видом електроприводу захвати поділяються на електромеханічні, пневматичні і гідравлічні. За видом руху губок – із поступальним і поворотним рухами, що здійснюється відповідними механізмами затиску.

Вузько діапазонні захоплювальні пристрої при переналагодженні забезпечують можливість закріплення деталі за поверхню з розмірами, що включають сусідні менші значення ряду: 1; 4; 12; 32; 63; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500 мм. Ці захоплення зазвичай виконуються на базі клинових і важільних механізмів.

Широко діапазонні захоплення мають можливість закріплення без переналагодження деталей з розмірами, що включають сусідні менші значення зазначеного вище ряду. Ці захоплення виконують зазвичай з використанням рейкових і зубчастих передавальних механізмів. Вони мають більш широкі технологічні можливості, ніж вузько захватні. Механічні захоплювачі використовуються для завантаження верстатів деталями типу тіл обертання або коробчастої форми.

Широке застосування знаходять багатопозиційні (багатомісні) захоплювальні пристрої. За наявності на «руці» робота двох захоплень цикл завантаження-розвантаження обладнання скорочується. Під час обробки деталі робот захоплює заготовку для обробки і зміщується на максимально близьку відстань до робочої зони (рис. 4.19).



Рисунок 4.19 – Захоплювальний пристрій робота

Після закінчення обробки ПР вільним захоплювальним пристроєм захоплює оброблену деталь і після повороту встановлює заготовку в пристосування верстата. Під час обробки нової заготовки робот укладає оброблену деталь у тару або на тактовий стіл. У результаті поєднання допоміжних переходів із роботою верстата час завантаження може скоротитися у 2–3 рази. Сучасні захоплювальні пристрої, крім захоплень для утримання заготовок, мають захвати для зміни інструментальних головок або блоків і тощо.

Захвати розрізняються також формою і матеріалом губок, що викликано різноманітністю переносних об'єктів. З метою використання одних і тих саме конструкцій захватів для маніпулювання з різними за формою і габаритними розмірами, їх губки виконуються відокремленими і легко змінними.

В окремих технологічних процесах, наприклад у механообробці, об'єкт, проходячи стадії від заготовки до готового виробу, значно змінює свою форму і габаритні розміри. Для обслуговування таких процесів робот забезпечується змінними захватами або змінними губками, крім того їхня зміна часто проводиться автоматично за допомогою самого робота.

Промислові роботи зазвичай комплектують набором типових захоплювальних пристроїв. Часто при переході на обробку іншої деталі змінюють не само захоплення, а його змінні робочі елементи (призми, губки тощо).

4.6 Динаміка кінематичних ланок та механізмів

Під час роботи ПР ланки реальних механізмів під дією сил і моментів деформуються. Водночас точки або перетини цих ланок мають відносні переміщення, які впливають на їхній закон руху. Визначити такі недоліки можна теоретично з використанням динамічних моделей. Для реальних механізмів, що враховують податливість ланок, такі моделі поділяються на дискретні та моделі з розподіленими параметрами [13, 23–25].

Дискретні моделі як більш прості застосовуються частіше. У цих моделях інерційні параметри розглядаються як зосереджені в точках або перетинах ланки. Податливість ланки подається як пружний зв'язок (пружна кінематична пара) між цими масами або моментами інерції.

Рух механізмів та кінематичних ланок визначається шляхом розв'язання задач динаміки, до яких належать:

- усунення резонансних режимів роботи механічної системи і зміна її динамічних параметрів;

- зниження віброактивності системи, рівня коливань (порушуваних або звукових тощо);
- підвищення динамічної точності;
- застосування вібрацій або коливань для виконання технологічних операцій.

Такі завдання вирішуються на базі загальних методів дослідження динаміки лінійних і нелінійних механічних систем. Кожна з розглянутих задач може бути сформульована як пряма (завдання аналізу) або як зворотна (завдання синтезу).

У прямих завданнях динаміки за відомих динамічних параметрів системи визначають закон її руху та інші характеристики. У зворотних задачах – за заданими параметрами закону руху, частотами або формами коливань визначаються динамічні або конструктивні параметри системи: маса, жорсткість, коефіцієнти демпфірування, зовнішні сили та інше.

Розв’язання оберненої задачі або задачі синтезу більш складне, тому що часто вона має безліч припустимих рішень, з яких необхідно вибрати оптимальне.

Під час роботи динамічної системи виникають механічні коливання, які надають їй рух відповідно узагальненим координатам. Разом із тим їхні похідні змінюються в часі періодично зростаючи або убуючи [13, 23–25]

До основних видів механічних коливань належать:

- вільні або власні коливання, що відбуваються без змінного зовнішнього впливу і надходження енергії ззовні;
- періодичні, за яких значення узагальненої координати і її похідних циклічно повторюються. Якщо ця умова не виконується, то коливання будуть аперіодичні;
- вимушені, що викликаються і підтримуються змінною у часі зовнішньої сили;
- параметричні, які викликаються зміною в часі динамічних параметрів системи (жорсткості, маси або моменту інерції, демпфірування);
- автоколивання, які називаються стаціонарними і збуджуються та підтримуються завдяки енергії, що надходить від джерела не коливального характеру, і в якій надходження енергії регулюється рухом самої системи;

Під час використання динамічних моделей, що відображає зміну даного явища в часі нехтують деякими властивостями об’єкта (припущеннями). Інші властивості зберігаються незмінними (критерії адекватності моделі досліджуваного об’єкта). У цьому випадку до них належать:

- кінетичні і потенційні енергії, якими володіють ланки і пружні елементи об'єкта, які дорівнюють кінетичної і потенційної енергії відповідних елементів моделі;
- роботи зовнішніх сил і моментів для об'єкта і моделі рівні;
- ланки моделі (без урахування їхньої деформації) повинні рухатися з однією частотою або швидкістю.

Під час формування дискретної динамічної моделі приймаються такі припущення:

- деформація пружних зв'язків, що підкоряються закону Гука;
- інерційні властивості ланок відображаються зосередженими в точках масами або зосередженими в перерізі моментами інерції.

Розглянемо як приклад двомасову модель електроприводу з пружними зв'язками.

Механічна система (рис. 4.20) складається з двигуна (1), редуктора і виконавчого пристрою (2). На рисунку 4.20 прийняті такі позначення:

I_1 і I_2^* – моменти інерції відповідно ротора двигуна і виконавчого пристрою; c_1 і c_2^* – крутильні жорсткості відповідно вхідного і вихідного валів; M_∂ і M_c – моменти рушійних сил і сил опору; кутові координати: φ_1 – ротора двигуна, φ'_1 – шестерні редуктора, φ'_2 – колеса редуктора, φ_2^* – виконавчого пристрою.

Згідно з прийнятими припущеннями необхідно привести до руху всі рухомі ланки системи щодо руху з частотою (або швидкістю) вала двигуна. Для цього визначаються наведені моменти, жорсткість та моменти інерції.

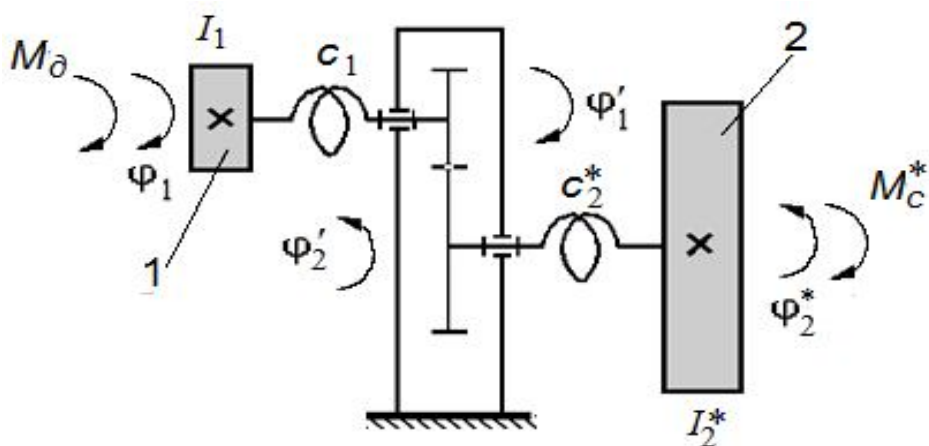


Рисунок 4.20 – Двомасова модель електроприводу з пружними зв'язками

Разом із тим, жорсткості наводяться з умови рівності потенційних енергій деформації, моменти – з умови рівності робіт, моменти інерції – з рівності кінетичних енергій.

Для конкретного прикладу передавальне відношення редуктора:

$$u_{12} = \frac{\varphi_1'}{\varphi_2'}. \quad (4.19)$$

Робота загальних сил залежно від зміни кінетичної енергії:

$$A_{\Sigma} = \Delta T + \Delta \Pi, \quad (4.20)$$

де ΔT – зміна кінетичної енергії системи:

$$\Delta T = \frac{I_1 \varphi_1^2}{2} + \frac{I_2^* (\varphi_2^*)^2}{2} - T_n, \quad (4.21)$$

де $\Delta \Pi$ – зміна потенційної енергії системи:

$$\Delta \Pi = \frac{c (\varphi_1 - \varphi_2^*)^2}{2} - \Pi_n \quad (4.22)$$

де T_n і Π_n – початок змін кінетичної і потенційної енергій.

Наведений момент інерції виконавчого пристрою:

$$I_2 = \frac{I_2^*}{u_{12}^2}. \quad (4.23)$$

Наведена крутильна жорсткість вихідного вала

$$c_2 = \frac{c_2^*}{u_{12}^2}. \quad (4.24)$$

Наведена кутова координата виконавчого пристрою

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_2^*}{u_{12}}. \quad (4.25)$$

Наведений момент опору на валу виконавчого пристрою:

$$M_c = M_c^* \cdot u_{12}. \quad (4.26)$$

Після приведення до одній частоті обертання розрахункова схема динамічної моделі має вигляд, зображений на рисунку 4.21.

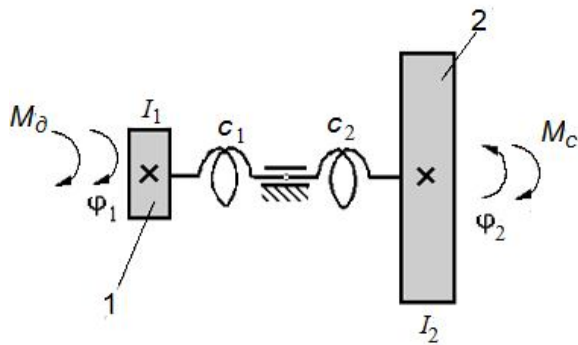


Рисунок 4.21 – Розрахункова схема динамічної моделі [13,23–26]

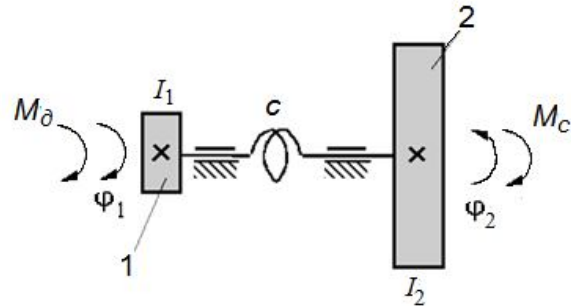


Рисунок 4.22 – Остаточна розрахункова схема динамічної моделі [13,23–26]

Два послідовно з'єднаних елементи системи можна замінити одним еквівалентним, водночас підсумовуються податливості цих елементів:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}, \quad c = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}. \quad (4.27)$$

У результаті остаточно розрахункова схема має вигляд, що показаний на (рисунку 4.22).

Положення ланок динамічної моделі може визначатися двома узагальненими координатами φ_1 і φ_2 . Рівняння руху динамічної моделі відображається у вигляді умов кінетостатичної рівноваги ланок (наприклад, 1 і 2, рис. 4.20) [13, 23–25].

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + c(\varphi_1 - \varphi_2) &= M_\delta \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 - c(\varphi_1 - \varphi_2) &= -M_c \end{aligned} \quad (4.28)$$

де $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ – другі похідні ланок за часом.

Розділивши перше рівняння системи (4.28) на I_1 , а друге на I_2 , отримується рівняння системи:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 + \frac{c}{I_1}(\varphi_1 - \varphi_2) &= \frac{M_\delta}{I_1}, \\ \ddot{\varphi}_2 - \frac{c}{I_2}(\varphi_1 - \varphi_2) &= \frac{M_c}{I_2}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Перетворення рівнянь (4.29) та (4.28) приводить до системи у такому вигляді:

$$\begin{aligned} (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) + c \left(\frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \right) \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = \\ = \frac{M_{\partial}}{I_1} + I_1 \ddot{\varphi}_1 + I_2 \ddot{\varphi}_2 = M_{\partial} - M_c . \end{aligned} \quad (4.30)$$

Позначивши деформацію пружного зв'язку як $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, то її друга похідна за часом $\ddot{\varphi}_{12} = \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2$, звідки $\ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_{12}$.

Позначивши також:

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \quad \text{або} \quad I = \frac{I_1 \cdot I_2}{I_1 + I_2}; \quad I_{\Sigma}^{np} = I_1 + I_2.$$

де I_{Σ}^{np} – наведений сумарний момент інерції.

За підстановки позначень у (4.30) отримується система рівнянь:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_{12} + \frac{c}{I} \varphi_{12} = \frac{M_{\partial}}{I_1} + \frac{M_c}{I_2}, \\ I_{\Sigma}^{np} \cdot \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_{12} = M_{\partial} - M_c \end{aligned} \quad (4.31)$$

Пружні вимушені коливання в системі визначаються відповідно (4.31). У цьому випадку перше рівняння системи (4.31) містить тільки координату деформації пружного зв'язку φ_{12} , яка характеризує пружні коливання в системі. Друге рівняння – має координату φ_1 , яка пов'язана з рухом системи без деформації. Розглянемо рішення першого рівняння системи (4.31) за таких вихідних даних:

$$M_{\partial} = \text{const}, \quad M_c = M_{c0} + \tilde{M}_c \cdot \sin \omega t, \quad (4.32)$$

де M_{c0} – момент опору без деформації;

\tilde{M}_c – момент опору під час пружної деформації;

ω – частота коливань з урахуванням обурювальних сил.

З урахуванням (4.32) перше рівняння системи (4.31):

$$\ddot{\varphi}_{12} + \frac{c}{I} \cdot \varphi_{12} = \frac{M_{\partial}}{I_1} + \frac{M_{c0}}{I_2} + \frac{M_c}{I_2} \cdot \sin \omega t. \quad (4.33)$$

Для визначення вимушених коливань вводяться такі позначення:

$$p^2 = \frac{c}{I}, \quad \varepsilon_0 = \frac{M_{\partial}}{I_1} + \frac{M_{c0}}{I_2}, \quad \tilde{\varepsilon}_c = \frac{\tilde{M}_c}{I_2}, \quad \varphi_{12} = q + \frac{\varepsilon_0}{p^2}, \quad \ddot{\varphi}_{12} = \ddot{q},$$

які підставляються у рівняння (4.33). Після перетворення:

$$\ddot{q} + p^2 \cdot q = \tilde{\varepsilon}_c \cdot \sin \nu t \quad (4.34)$$

Рішення цього рівняння за $p = \nu$ і початкових умовах:

$$t = 0, \quad q = q_0, \quad \dot{q} = \dot{q}_0,$$

$$q = q_0 \cdot \cos p \cdot t + \frac{\dot{q}_0}{p} \cdot \sin p \cdot t - \frac{\tilde{\varepsilon}_c \cdot \nu}{p(p^2 - \nu^2)} \cdot \sin pt + \frac{\tilde{\varepsilon}_c}{p^2 - \nu^2} \cdot \sin \nu t, \quad (4.35)$$

де $q_0 \cdot \cos p \cdot t + \frac{\dot{q}_0}{p} \cdot \sin p \cdot t$ – вільні коливання з частотою p ;

$\frac{\tilde{\varepsilon}_c \cdot \nu}{p(p^2 - \nu^2)} \cdot \sin pt$ – гармонійні коливання з частотою p і з амплітудою, що

залежить від $\tilde{\varepsilon}_c$;

$\frac{\tilde{\varepsilon}_c}{p^2 - \nu^2} \cdot \sin \nu t$ – вимушені коливання з частотою ν з урахуванням

обурювальних сил.

Визначення власних частот коливання системи можливо, якщо прийняти $M_{\partial} = 0$ та $M_c = 0$. Тоді система, складена з першого рівняння (4.31) і другого рівняння (4.30), запишеться так:

$$\ddot{\varphi}_{12} + \frac{c}{I} \cdot \varphi_{12} = 0, \quad (4.36)$$

$$I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = 0$$

Розглянемо рішення системи (4.36) у вигляді:

$$\varphi_i = \varphi_{i0} \cdot \sin pt. \quad (4.37)$$

Диференціюючи вираз (4.37) два рази з підстановкою у (4.36), отримуються рівняння:

$$\ddot{\varphi}_i = -\varphi_{i0} \cdot p^2 \cdot \sin pt, \quad (4.38)$$

$$\left(-p^2 + \frac{c}{I}\right) \cdot \varphi_{120} \sin pt = 0, \quad (4.39)$$

$$-(I_1 \cdot \varphi_{10} + I_2 \cdot \varphi_{20}) \cdot p^2 \sin pt = 0.$$

Якщо з першого рівняння прийняти $\varphi_{120} \neq 0$, то

$$-p^2 + \frac{c}{I} = 0, \quad p_{1,2} = \sqrt{\frac{c}{I}}. \quad (4.40)$$

Якщо з другого рівняння прийняти:

$$(I_1 \cdot \ddot{\varphi}_{10} + I_2 \cdot \ddot{\varphi}_{20}) \neq 0, \quad \text{то} \quad p^2 = 0, \quad p_{34} = 0. \quad (4.41)$$

Нульові частоти відповідають руху системи без деформації.

Для визначення форм коливань приймається, що за деформації системи її власна частота не дорівнює нулю, тобто $p \neq 0$. Тоді

$$I_1 \cdot \varphi_{10} + I_2 \cdot \varphi_{20} = 0 \text{ та } \frac{\varphi_{10}}{\varphi_{20}} = -\frac{I_2}{I_1}. \text{ Якщо прийняти } \varphi_{10} = 1, \text{ то } \varphi_{20} = -\frac{I_2}{I_1}.$$

Епюра кутових координат по довжині пружного зв'язку матиме вигляд, що показано на рисунку 4.23.

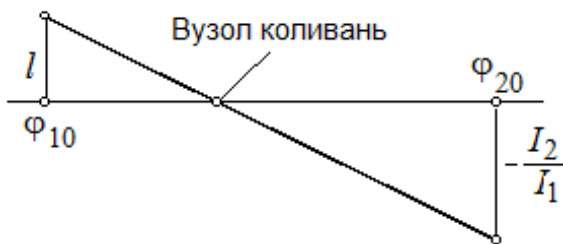


Рисунок 4.23 – Епюра кутових координат із деформацією

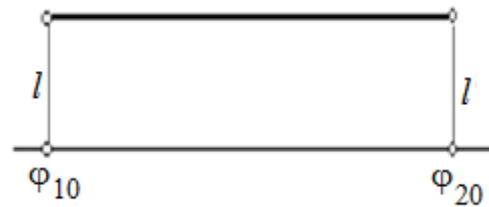


Рисунок 4.24 – Епюра кутових координат без деформації

За руху системи без деформації власна частота коливань $p = 0$.

Тоді $-p^2 + \frac{c}{I} \neq 0$, $\varphi_{120} = 0$, $\varphi_{10} = \varphi_{20} = 1$. Епюра кутових координат для руху без деформації показана на рисунку 4.24.

При розгляданні системи позиціонування механізму (де вихідна змінна повинна повторювати зміни вхідної величини) структурною ознакою є наявність на її виході інтегрувальної ланки (рис. 4.25) [13].

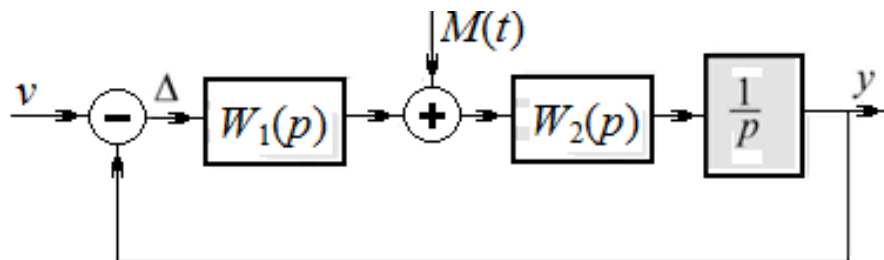


Рисунок 4.25 – Структурна схема системи позиціонування

Під час роботи системи виникає помилка в регулюванні

$$\Delta = \frac{p}{p + W_1(p) \cdot W_2(p)} \cdot v - \frac{W_2(p)}{p + W_1(p) \cdot W_2(p)} \cdot M, \quad (4.42)$$

де $W_1(p)$ та $W_2(p)$ – передавальні функції;

v – величина вхідного сигналу;

Δ – помилки при регулюванні;

$M(t)$ – зовнішнє сбурення.

Статична помилка, яка спричинена сбуренням, залежить від коефіцієнта посилення k_1 :

$$\Delta^0 = -\frac{1}{k} M. \quad (4.43)$$

Для характерного режиму «лінійного заведення», який використовується для оцінювання точності роботи систем, виникає швидкісна помилка і її статичне значення має вигляд:

$$\Delta^0 = \frac{1}{k_1 k_2} \cdot \eta - \frac{1}{k_1} M(t), \quad (4.44)$$

де η – вплив вхідного сигналу. Розглянемо на прикладі визначення параметрів системи керування «рукою» робота.

Приклад. Визначити швидкісну помилку в системі управління «рукою» робота [13] (рис. 4.26) основними елементами схеми системи є:

θ_0 – бажане (задане) положення «руки» робота;

$W_{рег}(p) = K_{рег}$ – передавальна функція регулятора;

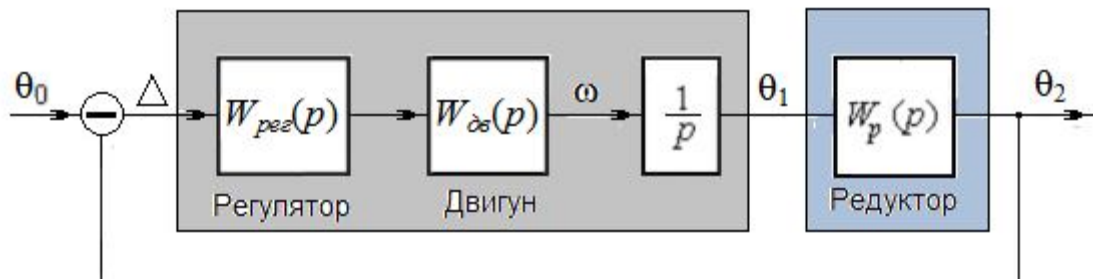


Рисунок 4.26 – Структурна схема системи управління «рукою» робота

Δ – помилки під час регулювання;

$W_{дв}(p)$ – передавальна функція двигуна;

ω – кутова частота обертання двигуна;

$W_p(p)$ – передавальна функція редуктора;

θ_1, θ_2 – значення вихідної величини двигуна та модуля.

Передавальні функції двигуна і редуктора мають вигляд:

$$W_{\partial\partial}(p) = \frac{0,6}{0,13p^2 + 1,43p + 1}, \quad W_p(p) = \frac{1}{30}.$$

Вираз помилки в системі

$$\Delta = \frac{p}{p + W_{\text{pez}}(p) \cdot W_{\partial\partial}(p) \cdot W_p(p)} \cdot \theta_0,$$

яка за режиму лінійного заведення ($\theta_0 = \frac{1}{p} \eta$; $\eta = \text{const}$) набере вигляду:

$$\Delta = \frac{1}{p + W_{\text{pez}}(p) \cdot W_{\partial\partial}(p) \cdot W_p(p)} \cdot \eta.$$

У статиці (за $p = 0$) швидкісна помилка системи:

$$\Delta^0 = \frac{1}{W_{\text{pez}}(0) \cdot W_{\partial\partial}(0) \cdot W_p(0)} \cdot \eta.$$

З урахуванням чисельних значень передавальних функцій вона буде дорівнювати $\Delta_0 = \frac{50}{K_{\text{рег}}} \eta$.

Під час моделювання процесів отримуються результати (рис. 4.27) відпрацювання лінійно-зростаючого сигналу системою з використанням програмного комплексу Simulink у середовищі Matlab за $K_{\text{рег}} = 250$ і $\eta = 1$.

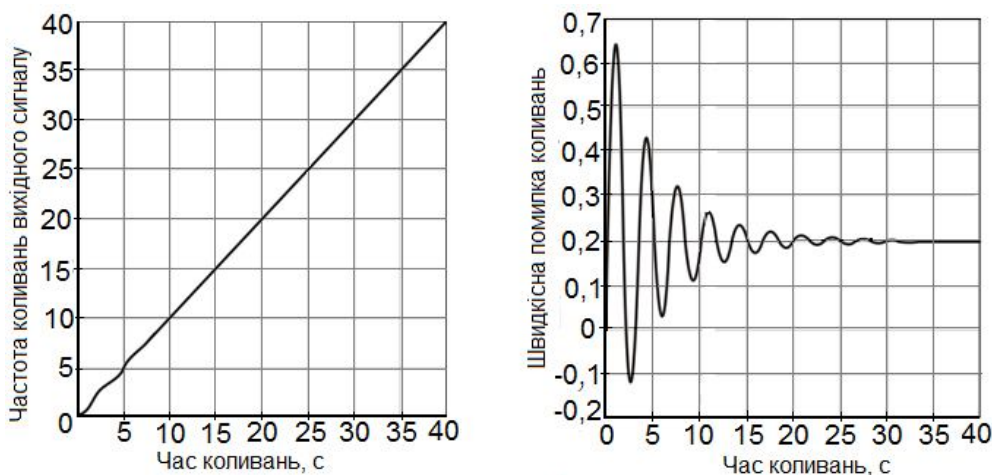


Рисунок 4.27 – Результати моделювання (для прикладу) [13]

Цим значенням відповідає швидкісна помилка $\Delta^0 = 20\%$ від η , що в реальній системі неприпустимо. Для забезпечення процесу спостереження із

заданою якістю в систему потрібно додати складніший регулятор, ніж пропорційна ланка.

Таким чином, розгляд динамічних моделей сприяє створенню модулів руху з урахуванням припущень, та визначенню необхідних параметрів, що впливають на роботу системи. На цей час зі створенням нових конструкцій роботизованих систем або модулів виникають і інші технічні конструктивні вимоги з урахуванням особливостей їх дії у навколишньому середовищі.

4.7 Системи керування робототехнічними пристроями

Найважливішою характеристикою робототехнічних пристроїв (РП) є система керування, яка визначає значною мірою сферу їхнього застосування, координати основних рухів і їхню орієнтацією, кількість ступенів рухливості, кількість захватних пристроїв і тощо.

Завдання управління РП є різноманітними і складають предмет теорії автоматичного управління з урахуванням специфічних вимог, що висиваються до них.

Система управління роботом складається з керувального пристрою і об'єкта (об'єктів) управління у вигляді маніпуляторів, пристроїв пересування (в разі рухомого робота) та інших, які можуть входити до складу робота або можуть бути конструктивно і технологічно самостійними і підлягають загальному управлінню.

Загальна схема автоматично діючої робототехнічної системи подана на рисунку 4.28.

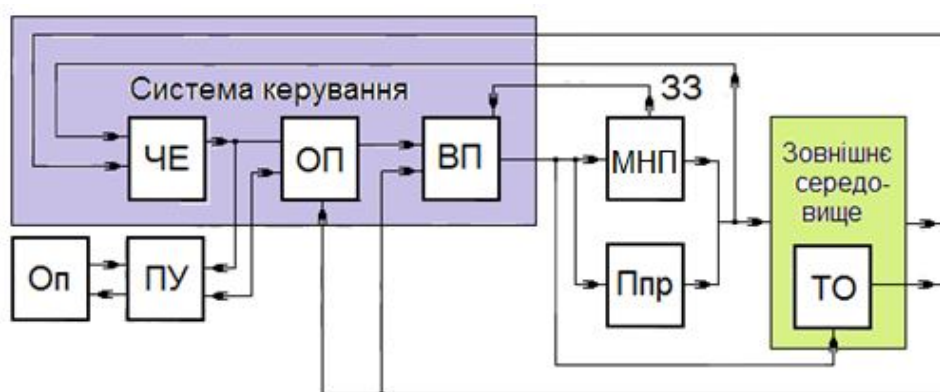


Рисунок 4.28 – Загальна схема робототехнічної системи:
ЧЕ – чутливий елемент; ОП – обчислювальний пристрій; ВП – виконавчий пристрій; МНП – маніпулятори; ОП – оператор; ПУ – пульт управління;
Ппр – пристрій пересування; ТО – технологічне обладнання;
ЗЗ – зворотний зв’язок

Система управління РП (СУ РП) має в загальному випадку багаторівневу структуру (рис. 4.29).

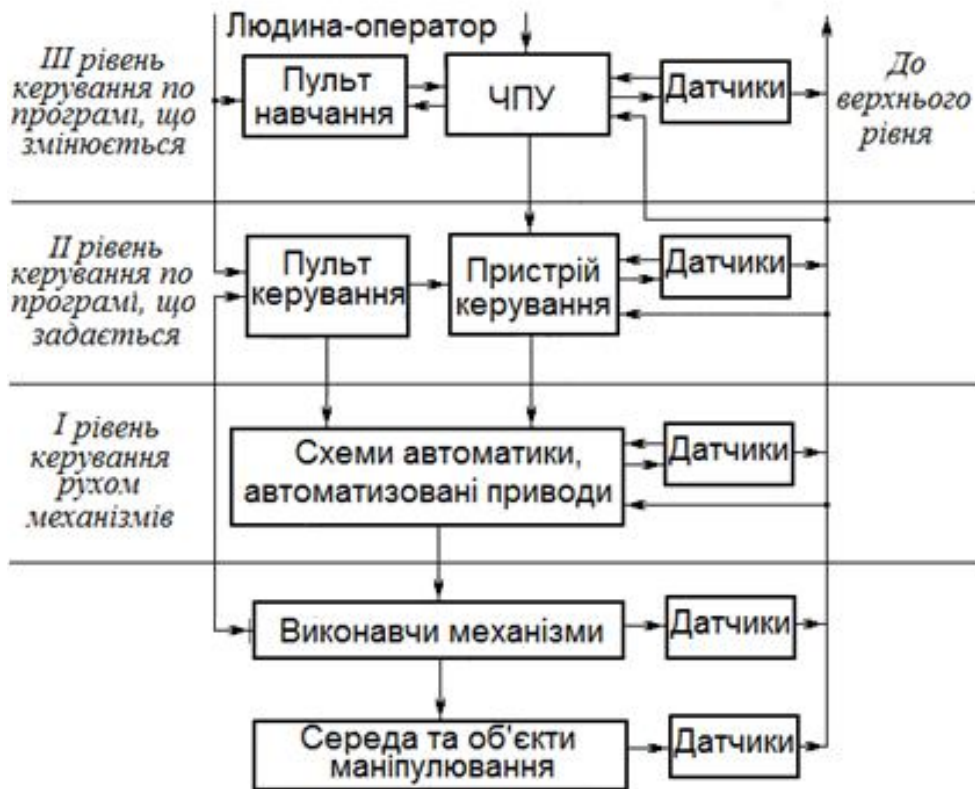


Рисунок 4.29 – Багаторівнева структура системи управління робототехнічних пристроїв

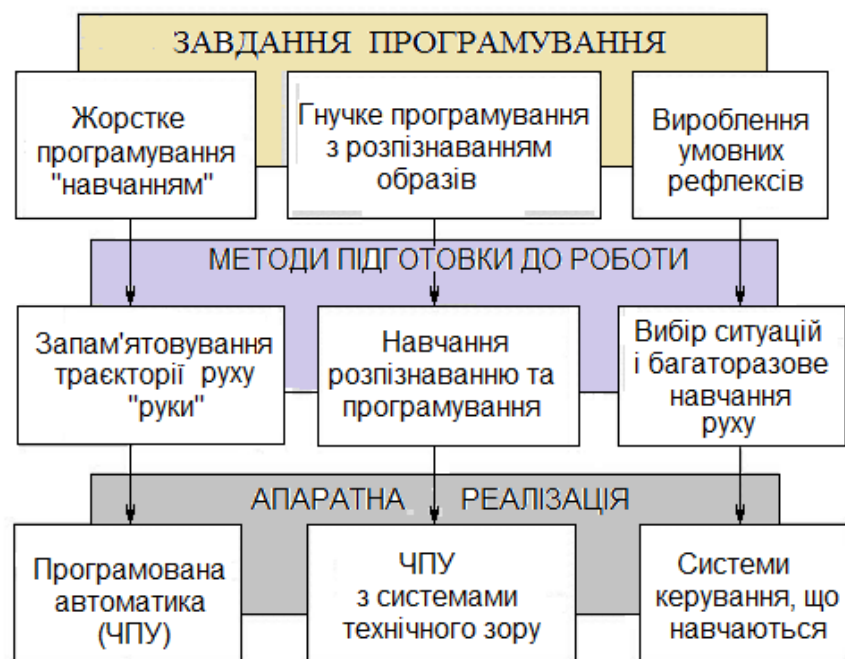
Перший (нижчий) рівень має пристрої управління рухами окремих ланок маніпулятора та інших виконавчих механізмів РП.

Цей рівень містить автоматизовані приводи і пристрої автоматики для всіх ступенів рухливості МНП, механізмів затиску, фіксації тощо. Керувальні програми цього рівня задають значення координат кожного зі ступенів рухливості МНП, величини швидкості й інші команди, що необхідні для здійснення їхніх приватних циклів.

На другому рівні системи РП формуються сигнали управління всіма приводами і пристроями автоматики МНП, що забезпечують необхідні переміщення його робочого органу (захоплення) у просторі та їхню послідовність під час виконання елементарних операцій у взаємодії з іншим технологічним обладнанням. Елементарні операції мають кілька приватних циклів рухів виконавчих механізмів МНП, верстата та іншого устаткування (наприклад, під час установки деталі в патроні верстата, переміщення обробленої деталі на розвантажувальну позицію і тощо).

На третьому рівні вирішуються укрупнені завдання управління під час обслуговування РП (наприклад, верстата). Для цього операція обслуговування представляється у вигляді необхідної послідовності елементарних операцій і їхніх параметрів, відповідно до програм, що введені в пристрій пам'яті ЧПУ–ЕОМ. Для реалізації цього рівня управління необхідні пристрої для навчання робота або системи автоматичного програмування РП.

Кожен рівень системи управління РП має зворотні зв'язки, за якими передається інформація про виконання команд на нижніх рівнях про внутрішній стан пристрою цього рівня, а також про характеристики зовнішнього середовища (наприклад, у яких обслуговується верстат і об'єкти маніпулювання). Оператор може безпосередньо брати участь в управлінні РП через спеціальні пристрої другого і третього рівнів. Зазвичай участь оператора в управлінні РП зводиться до попереднього налаштування і корекцій рухів під час виконання приватних циклів МНП або програмування необхідних операцій методом навчання РП. Основні підходи до вирішення завдання управління і пов'язані з ними методи підготовки до роботи подано на рисунку 4.30.



Рисунк 4.30 – Класифікація систем програмування робототехнічних пристроїв

Широке застосування отримав принцип класифікації РП з погляду способу відпрацювання керувальної програми. Розрізняють циклові, позиційні, контурні і комбіновані методи програмного керування РП.

Під час *циклового* керування програмуються послідовність руху і тимчасові інтервали між приватними циклами. Інформація про стан виконавчих механізмів задається зазвичай засобами шляхової автоматики тільки для певних (наприклад, крайніх) точок зони переміщення по кожній з координат. Такий тип управління властивий РП із пневматичним приводом.

Позиційне керування дозволяє програмувати незалежні переміщення по осях координат у довільні точки робочої зони маніпулятора. За контурного управління захоплення маніпулятора переміщується по траєкторії, що задається програмами в межах робочої зони робота.

Комбінований метод управління об'єднує можливості позиційного і контурного пристрою керування. Залежно від методу програмування розрізняють два варіанти пристроїв керування роботом:

- із безпосереднім програмуванням шляхом навчання, за якого оператор попередньо за допомогою спеціального пульта виконує необхідні дії маніпулятора;
- непрямым (розрахунковим).

Управління рухами РП у цьому випадку має здійснюватися програмованим керувальним пристроєм. Крім робочих рухів, необхідно керувати неробочими ходами:

- вихід на вихідну позицію на початку роботи;
- повернення у вихідну позицію після закінчення роботи тощо.

Крім вирішення завдань позиціонування (зокрема контурного руху), під час виконання технологічних операцій необхідно в низці випадків управляти положенням інструменту в заданій позиції.

Наприклад, за технологічного процесу зварювання (рис. 4.31) необхідно підтримувати незмінним відстань між електродом і зварюваними об'єктами у міру оплавлення електрода.

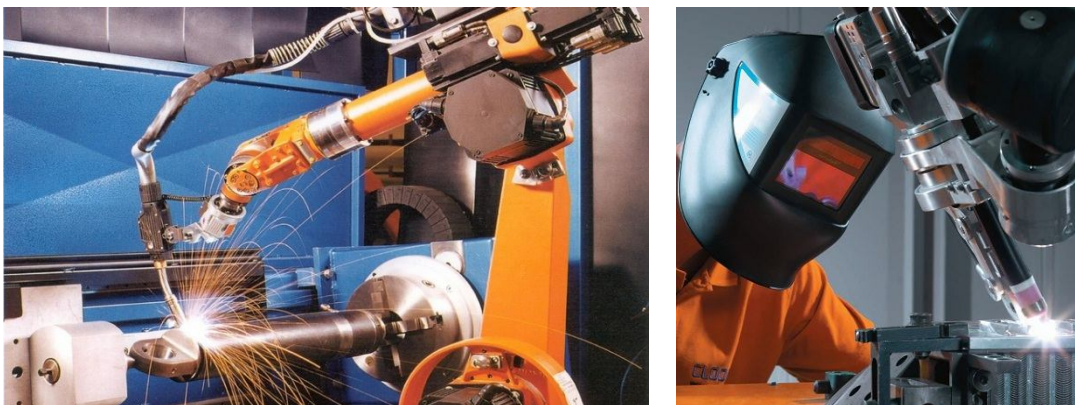


Рисунок 4.31 – Технологічний автоматизований процес зварювання

Крім того, для запалювання дуги також необхідно виконати низку маніпуляцій:

- торкнутися електродом матеріалу для виникнення дуги;
- відвести електрод на відстань, який відповідає сталому горінню;
- забезпечити в подальшому умови стабільного горіння.

Очевидно, для контролю відносного положення електрода і зварюваного матеріалу необхідно в системі управління мати чутливі елементи – датчики (оптичні або пневматичні). За їхніми сигналами здійснюється переміщення зварювальної головки з електродом. У деяких випадках для забезпечення якісного зварювання (особливо для товстих матеріалів) використовується рух електрода поперек шва для проварювання матеріалу. У цьому випадку потрібні складніші програми рухів.

Програмування рухів здійснюється заздалегідь на основі робочих креслень виробів або чітко визначених розміток переміщення (при транспортних операціях). Однак існують процеси, які недоцільно заздалегідь програмувати, а краще скористатися фіксуванням рухів висококваліфікованого досвідченого робітника (наприклад, під час фарбування фарборозпилювачем виробів складної форми). Програмування здійснюється методом навчання оператора командами. З пульта управління здійснюються послідовно операції фарбування, які запам'ятовуються керувальним пристроєм. Після закінчення процесу він може бути автоматично відтворений багаторазово за подальшої роботи. Метод навчання може використовуватися і в простіших випадках, наприклад під час переміщення виробів із початкового положення в задане за найбільш вигідною траєкторією.

Для контролю внутрішніх функціональних параметрів робототехнічних пристроїв використовуються *датчики* зворотного зв'язку, які розповсюджені в приводах, у вторинних джерелах живлення тощо.

Для визначення оперативної інформації про загальний стан зовнішнього середовища в системах керування робототехнічних пристроїв використовуються *сенсори*.

За видом властивостей зовнішнього середовища сенсорні пристрої роботів поділяються на дві групи:

- сенсорні пристрої, що використовують для визначення геометричних властивостей об'єктів;
- сенсорні пристрої, що виявляють інші фізичні властивості об'єктів.

Характерними представниками сенсорних пристроїв першої групи є вимірники координат (інформаційні лінійки, сканувальні локатори, координатори тощо).

Друга група сенсорних пристроїв, призначених для визначення фізичних властивостей об'єктів, найбільша і різноманітна. Вона складається з вимірювачів зусиль, щільності, пружності, температури, кольору, оптичної прозорості.

Інформація від сенсорних пристроїв використовується в системі управління робота для виявлення і розпізнавання об'єктів зовнішнього середовища, а також для управління рухом робота і його маніпуляторів. Відповідно до цього сенсорні пристрої можна розділити за призначенням на групи:

- пристрої, що призначені для визначення властивостей середовища;
- датчики для виявлення об'єктів у робочій зоні;
- датчики забезпечення переміщень виконавчих органів робота.

Прийнятий поділ сенсорних пристроїв за функціональним призначенням на групи в якоюсь мірою умовний. Наприклад, сенсорні пристрої першої групи можуть бути використані і для визначення положення робота в робочій зоні або захвата. Вони здатні виконувати функції датчиків зворотного зв'язку під час управління рухом маніпулятора.

Сенсорні пристрої робота можуть сприймати інформацію на різних відстанях від її джерела. За цією ознакою сенсорні пристрої поділяються на понад ближні, близькі й далекі.

Сенсорні пристрої понад ближньої (контактної) дії використовують для підняття чутливості робочих органів та інших частин маніпуляторів, а також корпусу робота. Вони дозволяють фіксувати їхній контакт з об'єктами зовнішнього середовища (тактильні датчики); вимірювати зусилля, що виникають у місці взаємодії (силометричні датчики); визначати прослизання об'єктів під час їхнього утримання захватним пристроєм.

Контактним сенсорним пристроям властива простота технічної реалізації, але вони накладають суттєві обмеження на динаміку, і насамперед, на швидкодію та управління роботом на всіх рівнях.

Тактильні сенсори відносять до найпростіших чутливих пристроїв. Вони слугують для сигналізації про доторкання робочого органу маніпулятора або корпусу робота з об'єктами зовнішнього середовища. Вони також використовуються для вирішення деяких завдань розпізнавання і визначення розмірів об'єктів. Ці пристрої можуть бути технічно реалізовані на кінцевих вимикачах, герметизованих магнітокерованих контактах, п'єзокристаличних перетворювачах на основі струмопровідної гуми тощо. Важливою вимогою, що висувається до цих датчиків, є висока чутливість (наприклад, спрацьовування при зусиллі в одиниці і десятки грамів) за малих габаритів, що поєднується з високою механічною міцністю і надійністю.

Сенсорні пристрої ближньої дії забезпечують отримання інформації від об'єктів, що розташовані безпосередньо поблизу від робочого органу маніпулятора, тобто на відстанях, порівнянних з його розмірами, і від корпусу робота. До таких пристроїв належать, наприклад, локаційні сенсори, різні далекоміри ближньої дії. Безконтактні вимірювальні пристрої технічно складніше контактних, але дозволяють роботів виконувати роботу з більшою швидкістю, а також заздалегідь отримувати інформацію про об'єкти до контакту з ними і відповідно коригувати свої дії.

Сенсорні пристрої дальньої дії використовуються для отримання інформації про зовнішнє середовище в обсязі всієї робочої зони робота. Для отримання необхідної інформації використовуються спеціальні сигнали (оптичні, радіотехнічні, радіаційні і тощо) або природні випромінювання середовища і окремих об'єктів.

Для підвищення надійності і швидкості виконання робочих операцій РП часто підвищують чутливість безконтактним рецепторним полем. Це завдання може бути вирішено, зокрема, за допомогою світлолокаційних і ультразвукових датчиків.

4.8 Роботизовані електромехатронні системи та модулі

Сучасною тенденцією проєктування та виробництва обладнання є використання блоково-модульного принципу. Для електромехатронних систем такими модулями є мехатронні модулі руху – синергетична сукупність механічних (гідромеханічних, пневмомеханічних), електротехнічних, електронних компонентів та інформаційних і програмних засобів, які реалізують досягнення заданого керованого руху. Це дає змогу проводити декомпозицію складних систем, зменшуючи кількість ступенів свободи, та отримати їхню необхідну ієрархічну структуру.

У багатьох сферах техніки електромехатронні системи змінюють традиційні електричні та механічні машини, які вже не відповідають сучасним якісним вимогам. Електромехатронний підхід у побудові машин нового покоління полягає в перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних, електронних, комп'ютерно-інформаційних компонент, які легко перепрограмуються під нове завдання та мають низьку вартість. Наприклад, функціональний аналіз нових виробничих машин доводить, що частка механічної частини на сьогодні скоротилася з 70 % (на початку 1990-х років) до 25–30 %. Принципово важливо підкреслити, що електромехатронний підхід у проєктуванні передбачає не

тільки розширення, а також заміщення функцій, які традиційно виконуються механічними елементами системи, на електронні та комп'ютерні блоки.

Сучасні технологічні та мобільні машини (верстати з ЧПК, автоматичні лінії, промислові роботи тощо) містять декілька електромехатронних модулів руху, які здійснюють переміщення в просторі робочих органів та виконавчих механізмів за заздалегідь заданою програмою траєкторією.

Характеристики технологічного середовища визначають за допомогою аналітико-експериментальних досліджень та методів комп'ютерного моделювання. Якщо для проведення таких досліджень потрібні складні та дорогі пристрої, вимірювальні технології, то доцільно використовувати методи адаптивного керування, які дають змогу автоматично корегувати закони руху робочих органів безпосередньо у процесі виконання операції за допомогою зовнішніх сенсорів інформаційної системи машини.

На цей час широко застосовуються технологічні машини – *гексаподи* (рис. 4.32), які використовуються у енергетичній та транспортній галузях для діагностики й обслуговування ліній електропередач та контактних мереж міського електротранспорту і систем захисту [1].

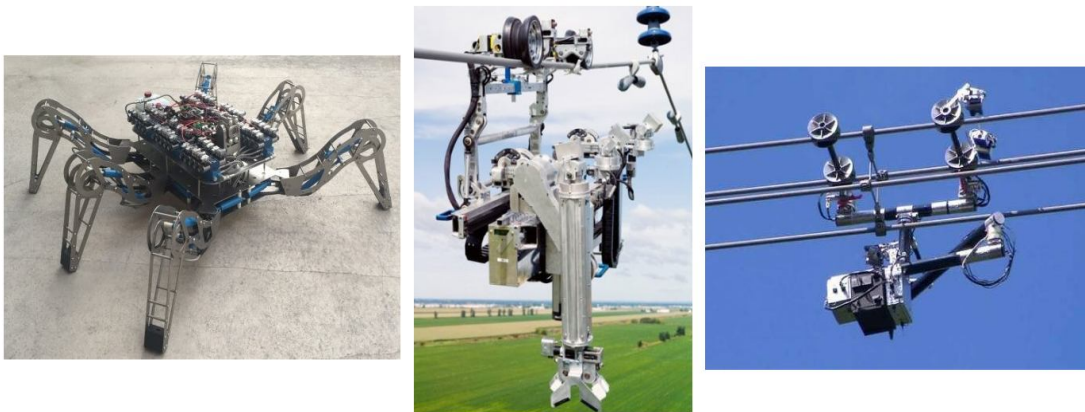


Рисунок 4.32 – Загальний вигляд технологічних машин-гексаподів [1]

Такі гексаподи також можуть бути у обробних верстатах, координатно-вимірювальних машинах. В основі їхньої конструктивної схеми знаходиться платформа Г'ю-Стюарта. Особливістю таких машин є механізм, який має шість незалежних ніг на шарнірних з'єднаннях. Довжину ніг можна змінювати, що приводить до зміни орієнтації платформи.

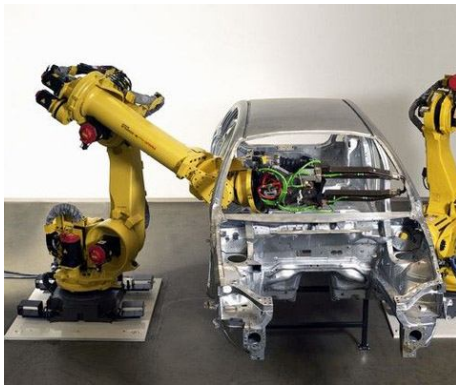
Синтез нових прецизійних, інформаційних і вимірювальних наукомістких технологій дає основу для проєктування та виготовлення інтелектуальних електромехатронних модулів і систем.

Надалі електромехатронні машини й системи будуть об'єднуватися в електромехатронні комплекси на базі єдиних інтеграційних платформ.

Мета створення таких комплексів – домогтися поєднання високої

продуктивності й одночасно гнучкості техніко-технологічного середовища завдяки можливості її реконфігурації. Це дасть змогу забезпечити конкурентоспроможність і високу якість продукції мехатроніки, що випускається на ринках ХХІ століття.

Яскравим прикладом електромехатронної системи є роботи та маніпулятори (рис. 4.33). Вони все частіше використовуються для збиральних операцій, зварювальних та фарбувальних робіт, виготовлення електронних друкованих плат, металообробки, у космічних дослідженнях і навіть у побуті.



а



б

Рисунок 4.33 – Промислові роботи: а – зварювальний; б – пакувальний [1]

Деякі різновиди роботів за конструкцією та призначенням подібні до руки людини. Інші робототехнічні системи створюють автоматичне переміщення вантажів, тому вони виглядають як візки (рис. 4.34).

Використання електромехатронних модулів у роботизованих системах і комплексах має широкий спектр:

- в автомобілебудуванні (наприклад, антиблокувальні системи гальм, системи стабілізації руху автомобіля та автоматичного паркування, автопілоти);



Рисунок 4.34 – Робокар (автоматичний візок) [1]

- нетрадиційних транспортних засобах (електровелосипеди, сегвеї, інвалідні візки, дрони, рис. 4.36);
- 3D-принтерах (рис. 4.35);

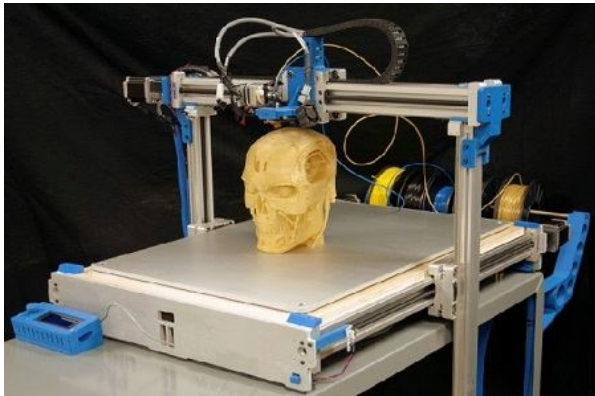


Рисунок 4.35 – 3D-принтер [1]



Рисунок 4.36 – Дрон [1]

- офісній техніці (наприклад, копіювальні й факсимільні апарати);
- елементах обчислювальної техніки (принтери, плотери, дисководи);
- технологічних лініях та пакувальних машинах харчової та обробної промисловості;
- поліграфічних машинах;
- побутовій техніці (пральні, швейні, посудомийні та інші машини) і фото- та відеотехніці;
- медичному обладнанні (реабілітаційне, клінічне, сервісне);
- тренажерах для підготовки пілотів і операторів тощо.

Інтелектуальні системи широко експлуатуються в Україні та в інших країнах світу. Ці системи керування можуть застосовуватися для будь-якого виду транспорту: залізничного, міського електричного, автомобільного, повітряного й водного.

Прикладом іншого інноваційного рішення є застосування електромехатронних систем в атомній енергетиці.

До таких комплексів або систем належать роботи у радіаційній розвідці. Як доводить досвід проведення радіаційних обстежень, є багато джерел випромінювання, які в просторі можуть бути не зафіксовані радіометричними системами. Тому використання стандартних радіометрів є неефективним. У зв'язку з цим для проведення вимірювань можуть застосовуватися роботизовані системи (рис. 4.37) із технологіями колімованої радіометрії.

Таких роботів оснащують відкритими та колімованими детекторами, відеокамерами тощо. Відкриті детектори вимірюють потужність дози радіації

в точці розміщення вимірювального блока. Колімований детектор проводить вимірювання потоків випромінювання.



Рисунок 4.37 – Роботизовані елетромехатронні системи для атомної енергетики [1]

Відеокамери зазвичай мають оптичне збільшення, що дає змогу докладно розглянути досліджуваний об'єкт.

Роботизовані системи можуть функціонувати в дуже важких умовах: за високих і низьких температур, обвалів, загазованості, запиленості, радіаційних та електромагнітних полях тощо.

Роботи можуть виконувати функції і носіїв апаратури для обстеження радіаційно-небезпечних об'єктів. Отже, робототехніка дає змогу проводити максимально ефективну радіаційну розвідку, не зважаючи на перебування людини на об'єкті.

Широко використовуються роботи-ліквідатори наслідків аварій шляхом збору радіаційних проб, очищення будівель від завалів і дезактивації атомних реакторів. Поштовх розвитку світового ринку робототехніки з метою ліквідації наслідків аварій на АЕС надала катастрофа, що сталася на «Фукусіма-1». У цьому випадку використовувалися дистанційно керовані роботизовані системи для виведення з експлуатації атомного реактора з метою зниження високого рівня радіації.

Сьогодні світовий ринок продовжує розвиватися у напрямку створення інтелектуальних елетромехатронних систем.

4.9 Робототехнічні комплекси та їхнє програмне забезпечення

Роботизовані технологічні комплекси (РТК) створюються на базі ПР і складають сукупну одиницю технологічного обладнання, ПР і засобів оснащення, які функціонують автономно і здійснюють багаторазові цикли.

Засобами оснащення РТК можуть бути пристрої накопичення, орієнтації, поштучної видачі об'єктів виробництва та інші пристрої, що забезпечують їхнє функціонування.

У системах РТК промислові роботи виконують два види робіт: транспортно-завантажувальні й основні технологічні. Транспортно-завантажувальні і транспортні промислові роботи автоматизують виконання низки допоміжних виробничих функцій і об'єднують обладнання в єдині системи. Вони є універсальними елементами промислових машин і забезпечують їхню гнучкість та мінливість зв'язків у них.

Наприклад, роботизація металорізальних верстатів (рис. 4.38) – спосіб автоматизації механообробного виробництва, заснований на застосуванні ПР для обслуговування технологічного обладнання з метою виключення ручної праці.

За допомогою ПР на металорізальних верстатах автоматизуються такі основні операції:

- установка заготовок у робочу зону верстата;
- зняття деталей з верстата і розкладка їх у тару (накопичувач);
- передача деталей від верстата до верстата;
- кантування деталей (заготовок) у процесі обробки;
- контроль розмірів деталей;
- очищення баз деталей і базованих поверхонь пристосувань;
- зміна інструменту.



Рисунок 4.38 – Роботизовані рішення механообробки

Найбільш доцільною формою впровадження ПР у серійне виробництво є застосування РТК, на базі яких надалі можуть бути створені роботизовані технологічні ділянки, цехи і підприємства. За організаційною ознакою РТК можуть функціонувати окремо як самостійний вид обладнання або можуть

бути об'єднані в роботизовані технологічні мережі (РТМ), роботизовані технологічні ділянки (РТД).

Роботизована технологічна мережа (рис. 4.39) – сукупність РТК, пов'язаних між собою транспортними засобами і системою управління, або кількох одиниць технологічного обладнання. Така система обслуговується одним або кількома ПР для виконання операцій в прийнятій технологічній послідовності.

Роботизована технологічна ділянка (рис. 4.40) – сукупність РТК, пов'язаних між собою транспортними засобами і системою керування, або кількох одиниць технологічного обладнання.



Рисунок 4.39 – Роботизована технологічна мережа



Рисунок 4.40 – Роботизована технологічна ділянка

Ділянка обслуговується одним або декількома ПР, у якій передбачена можливість зміни послідовності використання технологічного устаткування.

Таким чином, найважливішою характеристикою РТК, яка є визначальною в значній мірі їхньої галузі застосування, є компоновка, що відрізняється сукупністю ряду ознак:

- видом системи координат основних рухів і її орієнтацією;
- кількістю ступенів рухливості і рухів;
- кількістю захватних пристроїв.

Завдяки використанню роботизованих електромехатронних систем підвищується якість виробництва, створюються високотехнологічні лінії, зменшується використання ручної праці та багато інших переваг.

Програмне забезпечення РТК виконує синтез законів керування та аналіз кінематики і динаміки для оптимального та безпечного функціонування РТК під час виконання заданих технологічних операцій в довільних робочих середовищах, а також для створення зручних засобів відображення результатів синтезу, аналізу та моделювання РТК.

Відповідно до цього формулюються основні завдання, які повинна вирішувати система автоматизованого моделювання та проектування, а саме:

- синтез виконавчого механізму РТК;
- пряма і зворотна задачі кінематики;
- пряма і зворотна задачі динаміки;
- планування виконання технологічних операцій;
- синтез законів керування (як для транспортних операцій, так і для контурного керування);
- аналіз просторового розташування робота під час функціонування по заданому або синтезованому закону керування.

Схема проходження від технічного завдання до остаточного рішення із застосуванням системи автоматизованого проектування і моделювання наведена на рисунку 4.41.

Система автоматизованого моделювання призначена для дослідження РТК без проведення натурних експериментів і виготовлення прототипу розроблювального пристрою. Система моделювання дозволяє:

- синтезувати закони керування маніпуляторами,
- обчислювати геометрію маніпуляторів у процесі виконання робочих операцій;
- визначати точки зіткнень у процесі функціонування механізмів;
- розв'язувати пряму й обернену задачі кінематики;
- виконувати розрахунок динаміки руху досліджуваного механічного пристрою.

Спілкування користувача з системою моделювання виконується в діалоговому режимі. Дружній графічний інтерфейс супроводжує весь процес вирішення завдання.

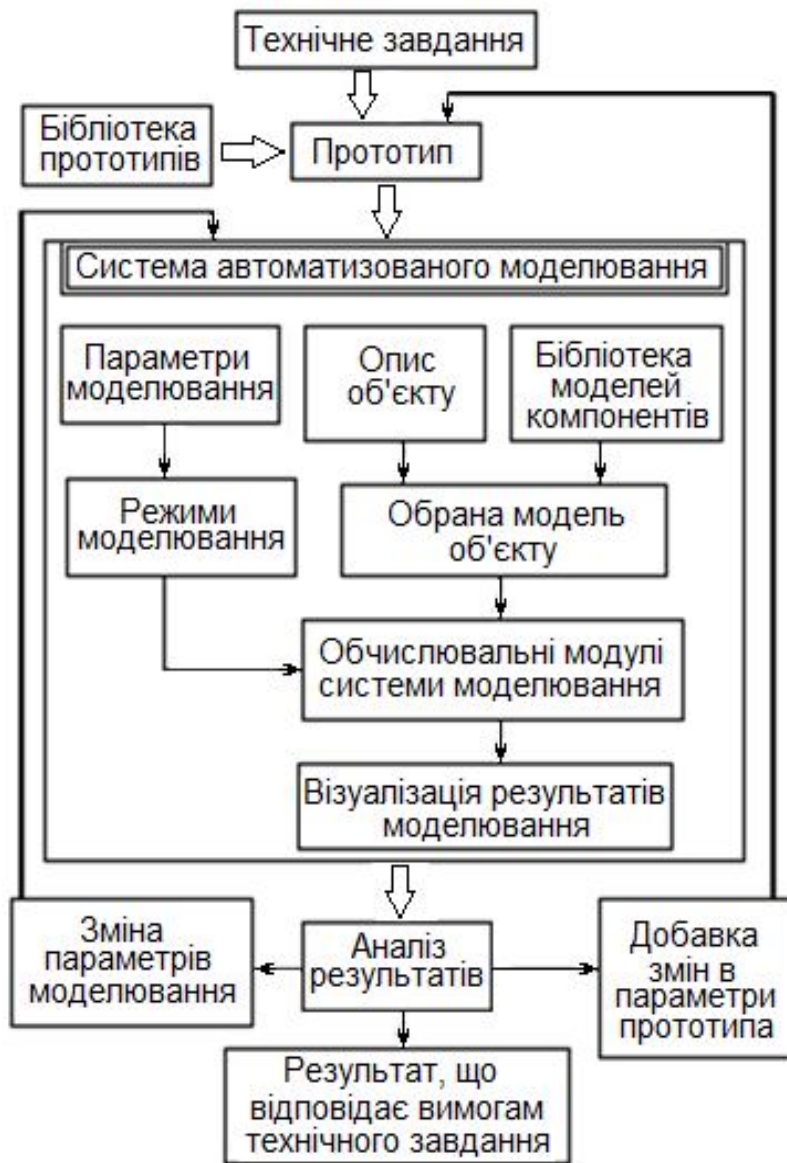


Рисунок 4.41 – Схема автоматизованого моделювання

Цей підхід дозволяє створити програмний продукт, що здатний досліджувати РТК із довільною конструкцією виконавчого механізму. Узагальнена структура системи автоматизованого моделювання РТК наведена на рисунку 4.42.

Система організована за модульним принципом. Її можна представити як керуюче ядро системи, що взаємодіє з модулями системи моделювання.

За функціональною ознакою в системі моделювання можна виділити п'ять основних блоків: керувальний, вхідної інформації, обчислювальний, інформаційний, вихідної інформації.

Керувальний блок організовує роботу всієї системи моделювання і забезпечує контроль над обробкою інформації на різних етапах технологічного ланцюжка вирішення завдань. Блок складається з двох модулів – керувального і сервісного, що забезпечують діалогову взаємодію користувача з системою моделювання.

Керуючий модуль забезпечує зв'язок всіх модулів системи моделювання і виконує загальне управління процесом вирішення завдання.

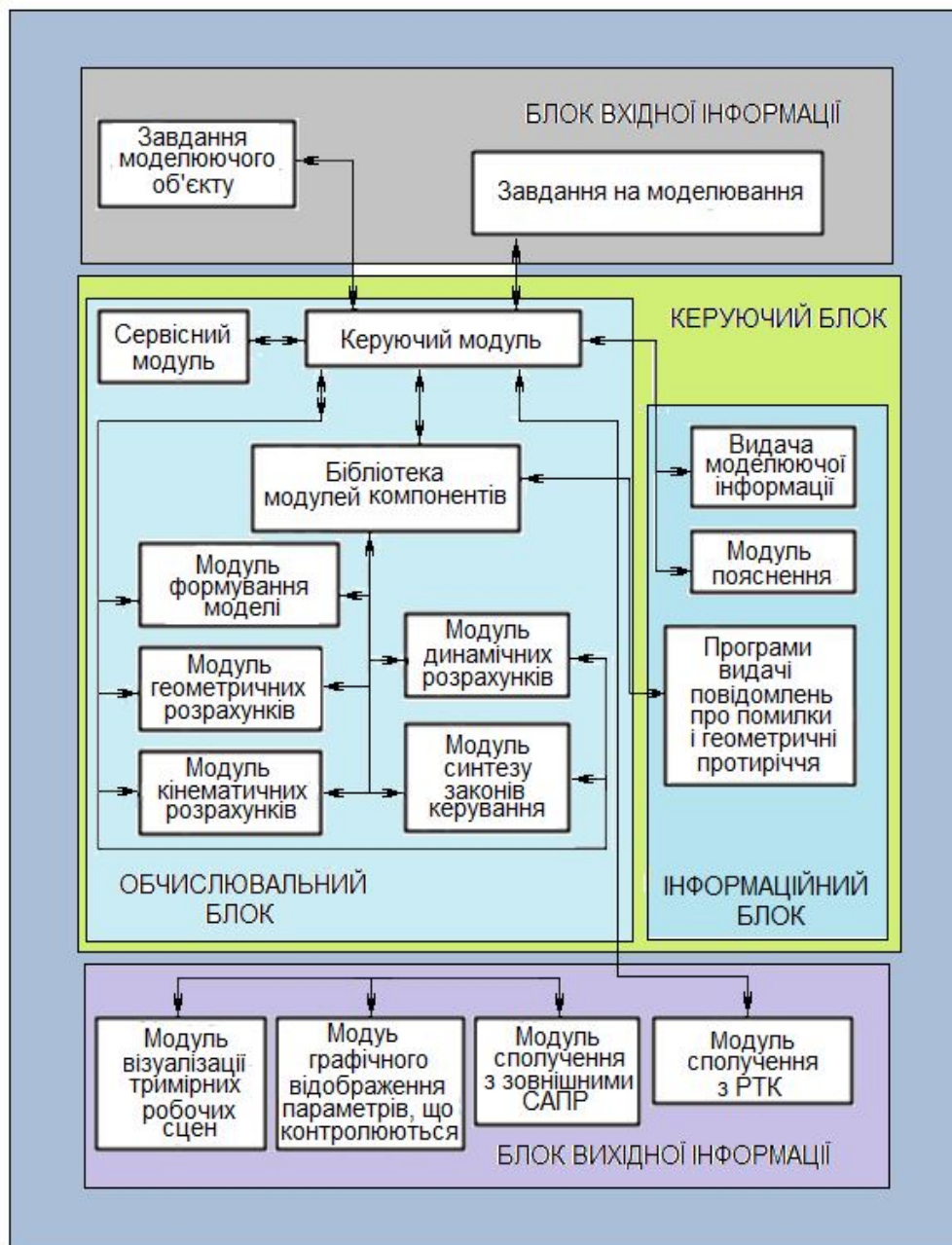


Рисунок 4.42 – Загальна структура системи автоматизованого керування робототехнічного комплексу

Сервісний модуль надає користувачеві можливість виконання ряду стандартних операцій над завданнями або її окремими файлами. Користувач може перейменувати, створити копію під іншим ім'ям або видалити всю задачу або окремі її файли.

Звернення до операцій над файлами завдань виконується через меню.

Блок вхідної інформації забезпечує формування завдання на моделювання, яке складається з опису модельованого об'єкта, робочої сцени і параметрів моделювання. Блок дозволяє працювати як з новими, так і з раніше створеними завданнями. Для цього використовуються модуль вводу-виводу і графічний редактор.

Цей модуль здійснює виконання операції читання з файлу завдання, збереження завдання у файлі і створення нового завдання.

Графічний редактор здійснює введення і редагування об'єкта, що моделюється і його робочого простору на основі формалізованого представлення робочого простору і РТК.

Обчислювальний блок має ряд модулів, які реалізують автоматичне формування математичної моделі досліджуваного об'єкта і його робочого простору, синтезують закони управління і виконують геометричні, кінематичні та динамічні розрахунки. Програми обчислювального блока використовуються моделями компонентів і керуючою програмою.

Модуль формування моделі спільно з бібліотекою моделей компонентів формує математичну модель, обчислює матриці перетворення між системами координат суміжних компонентів, а також матриці перетворення між пов'язаними системами координат компонентів і нерухомою системою координат.

Модуль геометричних розрахунків забезпечує розрахунок просторового положення механізму, що моделюється, і аналіз просторового розташування досліджуваного механізму на «геометричне протиріччя». Він також дозволяє вирішувати завдання:

- розміщення геометричних об'єктів у просторі з обмеженнями, аналіз функціонування маніпуляторів;
- аналізу зіткнень керованих механізмів з об'єктами робочої сцени;
- перевірки приналежності точок траєкторії руху робочих органів їхнім сервісним зонам обслуговування.

Модуль кінематичних розрахунків виконує розрахунок координат, швидкостей і прискорень центра мас компонентів, деталей і виробів загалом. Він також дозволяє вирішувати такі завдання:

- визначення швидкості та прискорення окремих складових досліджуваного пристрою та довільно заданої точки;

- обчислення зусиль, які виникають у кінематичних вузлах маніпулятора в процесі виконання запланованих дій;

- визначення центра мас окремих компонент або деталей, а також всього виробу загалом у процесі його функціонування.

Модуль динамічних розрахунків дозволяє визначити вплив інерційності, пружності, а також сил тертя на динамічні процеси в приводах маніпуляторів на процеси переміщення, швидкості та прискорення ланок кінематичного ланцюга.

Модуль синтезу законів управління забезпечує побудова плану траєкторії переміщення робочого органу РТК з урахуванням обходу перешкод, які перебувають на робочому просторі, а також синтезує закони управління кожним приводом маніпулятора. Модуль має різні алгоритми побудови плану траєкторії. Конкретний же алгоритм побудови вибирається інженером-дослідником безпосередньо перед обчислювальним експериментом. У процесі виконання завдання планування вирішуються пряме або зворотне завдання просторового розташування механізму, що моделюється. Для побудови законів керування використовуються методи поліноміальної та сплайнової апроксимації.

Інформаційний блок містить модуль пояснення і програми видачі повідомлень про помилки і про геометричні протиріччя.

Модуль пояснення дозволяє відповісти на питання: як і чому отриманий такий результат?

У блок вихідної інформації входять програми формування тривимірного зображення робочої сцени і досліджуваного об'єкта, графічного відображення контрольованих параметрів досліджуваного об'єкта, сполучення з РТК і сполучення з зовнішніми системами автоматичного проектування (САПР).

Модуль візуалізації тривимірних робочих сцен забезпечує формування на екрані дисплея графічного образу об'єкта, що моделюється, і його робочої сцени. На екрані монітора формується графічна імітація руху РТК у заданому робочому середовищі. Візуальне уявлення тривимірних робочих сцен забезпечується різними режимами візуалізації:

- каркасне уявлення зі збереженням всіх ліній;
- каркасне уявлення з видаленням невидимих ліній без зафарбовування граней;
- видалення невидимих ліній із коліром і нескінченно віддаленим джерелом світла.

Передбачені безперервний і по кадровий режим виведення зображення на екран монітора. Оперативна зміна параметрів візуалізації (наприклад,

масштабу зображення, напрямку погляду, способу побудови зображення) забезпечує інженера-дослідника зручним інструментом для візуальної оцінки результатів моделювання керованої механічної системи.

Модуль графічного відображення контрольованих параметрів виконує відображення траєкторії, швидкості і прискорення переміщення центра мас деталей в робочому просторі, а також керуючих функцій приводами маніпулятора у вигляді графіків.

Модуль сполучення з РТК дозволяє перетворити синтезовані закони управління РТК, що сформовані системою моделювання, у систему команд заданого маніпулятора.

Модуль сполучення з зовнішніми САПР забезпечує конвертування даних з внутрішнього формату системи моделювання у формат DXF. Конвертація проводиться в тривимірний образ робочої сцени або в проєкції, які в подальшому використовуються для створення конструкторської документації.

Бібліотека моделей компонентів є важливою складовою частиною системи моделювання, яка містить:

- тривимірні твердотільні компоненти;
- кінематичні вузли (лінійне переміщення і обертання) з обмеженнями і без них;
- моделі динамічних компонентів;
- моделі джерел;
- джерела заданого руху;
- джерела ідеальної швидкості;
- моделі вимірників.

Для характеристики широкого класу РТК достатньо використовувати невеликий набір моделей твердотільних компонентів (базовий набір), який має вигляд паралелепіпеду, циліндру, конусу, усіченого конусу, кулі, циліндру з осьовим отвором. Моделі компонентів працюють у постійній взаємодії з обчислювальними модулями системи.

Розроблена система моделювання дозволяє ефективно вирішувати багато завдань, що пов'язані:

- із контролем на відсутність зіткнень елементів механічної конструкції в процесі її функціонування, руху при заданих просторових обмеженнях;
- із перевіркою на виконання умов збирання, пошук оптимальних компонувальних рішень;
- із плануванням траєкторії переміщення робочого органу маніпулятора і розрахунком кінематики руху досліджуваного механічного пристрою.

Система моделювання реалізована на сучасній об'єктно-орієнтованій мові програмування і призначена для роботи на комп'ютерах.

Одним із найважливіших елементів системи автоматизованого моделювання робототехнічних комплексів є бібліотека моделей компонентів (БМК). Основу БМК складає базовий набір моделей, достатніх для моделювання широкого кола різних механічних пристроїв. Моделі БМК можна розділити на такі класи: тривимірні твердотільні примітиви, кінематичні вузли, джерела ідеальної швидкості, джерела зусиль, динамічні компоненти і вимірники.

Тривимірні твердотільні примітиви (паралелепіпед, циліндр, конус, усічений конус, куля, циліндр з осьовим отвором) є основою для конструювання просторових виконавчих механізмів РТК, об'єктів маніпулювання та технологічного обладнання.

Кінематичні вузли задають рухливі з'єднання двох типів: лінійне переміщення й обертання, тобто переміщення уздовж однієї з осей координат або обертання навколо однієї з осей координат. Допускається послідовне з'єднання моделей кінематичних вузлів, з тим щоб визначати складні закони переміщення твердотільних компонентів.

Джерела ідеальної швидкості складаються з таких моделей:

- постійної швидкості;
- постійної швидкості з плавним включенням;
- постійної швидкості з плавним включенням і затримкою;
- імпульсної швидкості;
- поступального руху з синусоїдальним законом зміни швидкості.

Джерела зусиль складаються з моделей:

- постійної сили,
- постійної сили з плавним наростанням,
- імпульсної сили і з синусоїдальним законом зміни сили.

Динамічні компоненти (такі як пружність, демпфер, інерційність) враховують пружно демпфірувальні сили, що виникають у реальних механізмах у процесі їхньої роботи.

Вимірювачі складають компоненти, що вимірюють координати поточного просторового положення заданої точки ланки виконавчого механізму РТК і відносного лінійного переміщення та обертання в ланках виконавчого механізму.

Перерахований набір моделей компонентів становить основу БМК і базовий набір моделей компонентів, за допомогою якого формуються математичні моделі виконавчих механізмів модельованих РТК і їхнього робочого простору. Методи, покладені в основу системи моделювання,

дозволяють кожному користувачеві самостійно будувати моделі необхідних механічних конструкцій. Користувач може доповнювати бібліотеку моделей і розвивати її відповідно до специфіки вирішуваних завдань.

В реальних конструкціях використовується велика кількість однотипних об'єктів, що складаються з сукупності жорстко пов'язаних між собою елементів механічної конструкції. Одні і ті ж сукупності елементів можуть зустрічатися в різних механічних пристроях, відрізняючись один від одного значеннями параметрів. Такі об'єкти називаються деталями.

Ефективність системи моделювання значно підвищується, коли поряд з БМК у неї записуються і моделі деталей. Це дозволяє накопичувати бібліотеку доволі складних деталей, що спрощує і робить наочніше опис складних механічних об'єктів. Одночасно відбувається налаштування системи моделювання на специфіку досліджуваних механізмів і РТК.

За допомогою запропонованого способу формується опис робочих сцен, таких як сукупність компонентів, деталей і виробів. Складові частини робочих сцен можуть бути описані у вигляді деталей або виробів і потім включені в бібліотеку. Отже, БМК дозволяє накопичувати налагоджені математичні моделі деталей і виробів і потім використовувати їх як складові частини під час побудови моделей складних РТК і робочих сцен.

Модель компонента становить достатньо складний обчислювальний модуль, який тісно взаємодіє з обчислювальним блоком системи моделювання. Для забезпечення такої тісної взаємодії розроблена узагальнена структура моделі компонента (рис. 4.43) та визначено режими її роботи. Поточний режим роботи моделі задається обчислювальним ядром системи моделювання і передається в модель компонента значенням змінної R .

Розглянемо основні блоки моделі компонента.

1. Блок завдання початкових значень формує початкові значення змінних компонентів, що використовувались обчислювальними моделями.

2. Блок обчислення функцій переходу за допомогою підпрограм модуля формування моделі обчислює матриці переходу між локальними системами координат пов'язаних компонентів і між локальною системою координат компонента і нерухомою системою координат. Компонент може бути базовим або приєднаним. Положення базового компонента задається відносно нерухомої системи координат, яка є основою для формування всієї робочої сцени, що включає РТК, об'єкти маніпулювання і різне технологічне обладнання. Положення приєданого компонента задається щодо локальної системи координат компонента, до якого приєднується поточний компонент.



Рисунок 4.43 – Структура моделі компонентів

Для базового компонента виконуються такі операції:

- обчислення матриці переходу з пов'язаної системи координат компонента (СКК) у нерухому систему координат (НСК) і вектора координат центру НСК у СКК;
- занесення в стек координати всіх точок приєднання (точок зв'язків) для приєднаних компонентів.

Для приєднаного компонента виконуються такі операції:

- вибір зі стека координати точок зв'язку попереднього компонента з поточним компонентом;
- обчислення матриці переходу з СКК поточного компонента в НСК, а також координати центра в НСК;
- занесення в стек координати всіх точок зв'язків із приєднаними компонентами.

3. Блок розгортки моделі компонента забезпечує видачу координат точок $P(xP, yP, zP)$, що належать заданому компоненту. Залежно від значення керувального параметра розгортка може виконуватися за обсягом або по поверхні модельованого компонента. Крок розгортки є змінним і автоматично вибирається в межах H_{min} - H_{max} , значення яких вказуються в

завданні на моделювання. Розгортка моделі компонента виконується підпрограмами обчислювального блоку системи моделювання.

4. Блок перевірки на геометричне протиріччя виконує перерахунок координат, де перевіряються точки в СКК поточного компонента, а також перевірку на потрапляння в область компонента. Якщо точка потрапляє в область компонента, то формується повідомлення про те що спостерігається взаємоперетини компонентів за допомогою програми блока вихідної інформації. Для того щоб уникнути повторних повідомлень про взаємоперетини пари компонентів, відбувається запам'ятовування інформації про кожну пару взаємних компонентів за допомогою підпрограми обчислювального блоку системи моделювання. Ця ж підпрограма стежить за загальною кількістю взаємоперетинів серед об'єктів робочої сцени, що моделюється [4]. Структурна схема блоку перевірки на геометричне протиріччя наведена на рисунку 4.44.

5. Блок кінематичних розрахунків має рівняння для обчислення лінійних і кутових швидкостей і прискорень, а також рівняння для обчислення сил і моментів. Рівняння записані в рекурентній формі. Обчислення кінематичних параметрів механізму виконується в два проходи. Перший прохід забезпечує обчислення лінійних і кутових швидкостей і прискорень, другий використовується для обчислення сил і моментів [5,6]. Використання рівнянь у рекурентній формі дозволяє провести кінематичні розрахунки без складання матричної системи рівнянь і подальшого її вирішення.

6. Блок динамічних розрахунків моделі компонента має рівняння, що забезпечує розрахунок функціонування досліджуваного пристрою з урахуванням пружно-інерційних сил, що виникають у процесі функціонування досліджуваного механізму.

Як і в блоці кінематичних розрахунків, рівняння представлені в рекурентній формі. Рішення диференціальних рівнянь здійснюється на основі явних формул чисельного інтегрування, що дозволяє зберегти рекурентну форму рівнянь, за якими виконуються динамічні розрахунки.

7. Блок планування траєкторії використовується моделями компонентів, що беруть участь у роботі алгоритмів побудови плану траєкторії переміщення захвата маніпулятора.

Під час виконання заданої технологічної операції цей блок є одним з етапів синтезу законів управління маніпулятором. Це завдання може вирішуватися для робочого середовища без перешкод, із відомим розташуванням перешкод і в середовищі з невідомим розташуванням перешкод.

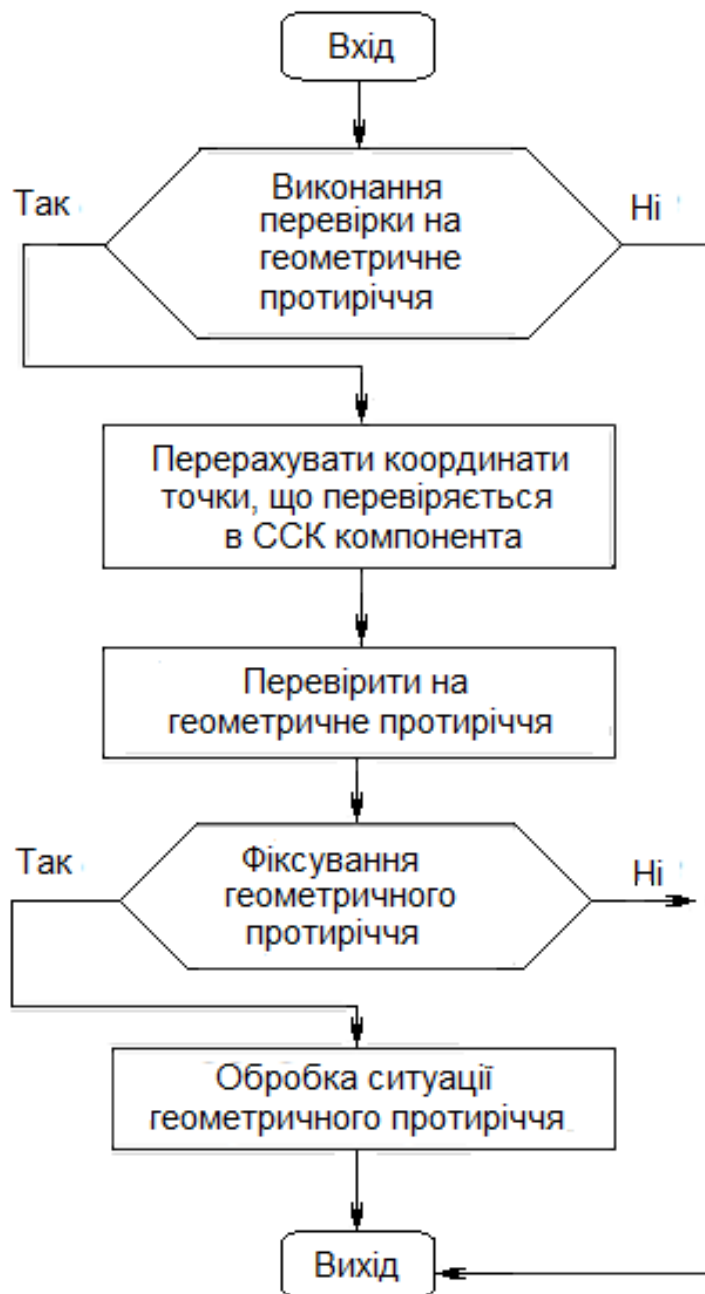


Рисунок 4.44 – Схема перевірки на геометричне протиріччя

Таким чином, розглянуті основні принципи створення моделей та побудови БМК, а також способів їхнього розвитку і єдиної програми організації роботи компонентів модуля. Кожен компонент працює в тісній взаємодії з керувальним модулем системи моделювання РТК. Сукупність компонентів є найважливішою складовою системи автоматизованого моделювання РТК, оскільки забезпечує опис геометрії досліджуваного механізму, різного типу кінематичних ланок, зовнішніх силових впливів, пружно-демпфівальних властивостей досліджуваних РТК тощо.

Контрольні запитання

1. Основа робототехнічних комплексів.
2. Назвіть головні елементи і параметри системних модулів роботів.
3. Кінематичні характеристики промислових роботів.
4. Функції та положення комплексних пар механізму маніпулятора.
5. Динамічні параметри маніпулятора під час навантаження та основні елементи.
6. Динаміка кінетичних ланок та механізмів.
7. Системи керування робототехнічними пристроями.
8. Роботизовані електромехатронні системи та модулі.
9. Робототехнічні комплекси та їхнє програмне забезпечення.
10. Загальна структура електромехатронних машин.
11. Приклади робочих органів: захватні пристрої, зварювальні кліщі.
12. Які основні функції виконує пристрій комп'ютерного керування?
13. Що є важливою складовою системи моделювання?
14. З яких моделей складаються джерела ідеальної швидкості?

5 ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

5.1 Технічна діагностика та методи діагностування

Для визначення параметрів і стану технічного об'єкта проводяться діагностичні засоби, які сприяють підвищенню надійності роботи електромехатронного пристрою. Розглянемо загальні положення та методи діагностування.

Система технічного діагностування – це сукупність засобів, об'єктів і виконавців, які необхідні для проведення діагностування за правилами, встановленими технічною документацією.

Технічна діагностика – галузь знань, що охоплює теорію, методи і засоби визначення технічного стану об'єкта. Призначення технічної діагностики в загальній системі технічного обслуговування – це зниження обсягу витрат на стадії експлуатації шляхом проведення цільового ремонту.

Технічне діагностування – процес визначення технічного стану об'єкта. Воно поділяється на тестове, функціональне і експрес-діагностування.

Тестове технічне діагностування – це діагностування, за якого на об'єкт подаються тестові впливи (наприклад, визначення ступеня зносу ізоляції електричних машин у системі електроприводу).

Функціональне технічне діагностування – це діагностування, за якому вимірюються і аналізуються параметри об'єкта при його функціонуванні прямим призначенням або в спеціальному режимі, (наприклад, визначення технічного стану підшипників кочення під час роботи електричних машин).

Експрес-діагностування – це діагностування за обмеженою кількістю параметрів за заздалегідь встановлений час.

Об'єкт технічного діагностування – виріб або його складові частини, що підлягають (піддаються) діагностуванню (контролю).

Технічний стан – це стан, що характеризується в певний момент часу за певних умов зовнішнього середовища значеннями діагностичних параметрів, установлених технічною документацією на об'єкт.

Засоби технічного діагностування – апаратура і програми, за допомогою яких здійснюється діагностування (контроль).

Зовнішні пристрої технічного діагностування – це пристрої діагностування, які конструктивно виконані окремо від об'єкта (рис. 5.1).

Під час діагностування визначається діагноз та прогнозується технічний стан об'єкта із заданою вірогідністю на майбутній інтервал часу, протягом якого зберігаються його працездатні(непрацездатні) функції.



Рисунок 5.1 – Зовнішні пристрої технічного діагностування

У процесі діагностування складається діагностична модель, яка характеризує об'єкт і використовується для вирішення завдань діагностування. Діагностична модель може бути представлена у вигляді сукупності графіків, таблиць або еталонів в діагностичному просторі. Для проведення послідовності дій технічного діагностування створюється алгоритм.

Залежно від вимог експлуатації об'єкта технічне діагностування може проводитися періодично або за планом. У будь-якому випадку такі види діагностування дозволяють:

- виконувати вхідний контроль агрегатів і запасних вузлів;
- зводити до мінімуму раптові позапланові зупинки технічного обладнання;
- управляти старінням обладнання.

Під час використання комплексного діагностування технічного стану обладнання вирішуються завдання:

- проведення ремонту по фактичному стану;
- збільшення середнього часу між ремонтами;
- зменшення витрат деталей у процесі експлуатації;
- зменшення обсягу запасних частин;
- скорочення тривалості ремонтів;
- підвищення якості ремонту й усунення вторинної поломки;
- продовження ресурсу роботи обладнання на науковій основі;
- підвищення безпеки експлуатації енергетичного обладнання.

Для вирішення таких завдань використовуються різні методи технічного діагностування.

Візуально-оптичний метод реалізується за допомогою лупи, ендоскопа, штангенциркуля та інших найпростіших пристосувань. Цим методом користуються зазвичай постійно, проводячи зовнішні огляди

устаткування під час підготовки його до роботи або в процесі технічних оглядів.

Віброакустичний метод реалізується за допомогою різних приладів для вимірювання вібрації об'єкта. Вібрація оцінюється по вібропереміщенню, віброшвидкості або віброприскоренню. Оцінка технічного стану цим методом здійснюється за загальним рівнем вібрації в діапазоні частот 10–1000 Гц або по частотному аналізу в діапазоні частот 0–20 000 Гц.

Такий метод використовується переважно для діагностики асинхронних електродвигунів (АД) в оперативному режимі.

Зміст цього методу полягає в аналізі спектру гармонік струму, що споживає електродвигун. Це відбувається шляхом виявлення періодично повторювальних змін сигналу на графіках, які відповідають конкретному виду пошкодження електродвигуна. Розглянемо особливості одного із методів віброакустичної діагностики.

Під час роботи АД завжди існує дисбаланс маси ротора і не совісність вала. Такий процес, що призводить до зростання пікових компонентів у частоті обертання двигуна і до виникнення гармонік в його вібраційному спектрі. У разі пошкодження стрижня ротора відбувається коливання швидкості з частотою $2sf_s$. Це коливання діє як частотна модуляція на частоті обертання і на двох частотах бічних смуг $((f_r - 2sf_r)$ та $(f_r + 2sf_r)$, які проявляють частоту пошкоджень f_r у спектрі вібрації. Коли дисбаланс ланцюга ротора збільшується, величина коливання швидкості, а також величини частоти бічної смуги теж збільшуються. Отже, величини $(f_r \pm 2sf_r)$ необхідно ретельно вимірювати у разі виявлення пошкоджень стрижня. В роботі [27] представлені результати діагностування, де виявлені пошкодження стрижня при зміні навантаження на валу двигуна в результаті виникнення вібрації (рис. 5.2).

Спектри відмінності в бічних смугах між справним станом і зламанім стрижнем ротора на обох боках спектра вібрації знімаються за 75 % повного навантаження АД. Отже, із використанням цього методу діагностування можна визначати пошкодження у підшипниках АД.

Недоліком методу є недостовірність результатів діагностики через появу помилкових гармонік сигналу за різних перешкод електричної мережі, до якої під'єднаний електродвигун.

Під час діагностування АД визначаються інші параметри залежно від постановки задач, які відображають процес зміни роботи двигуна.

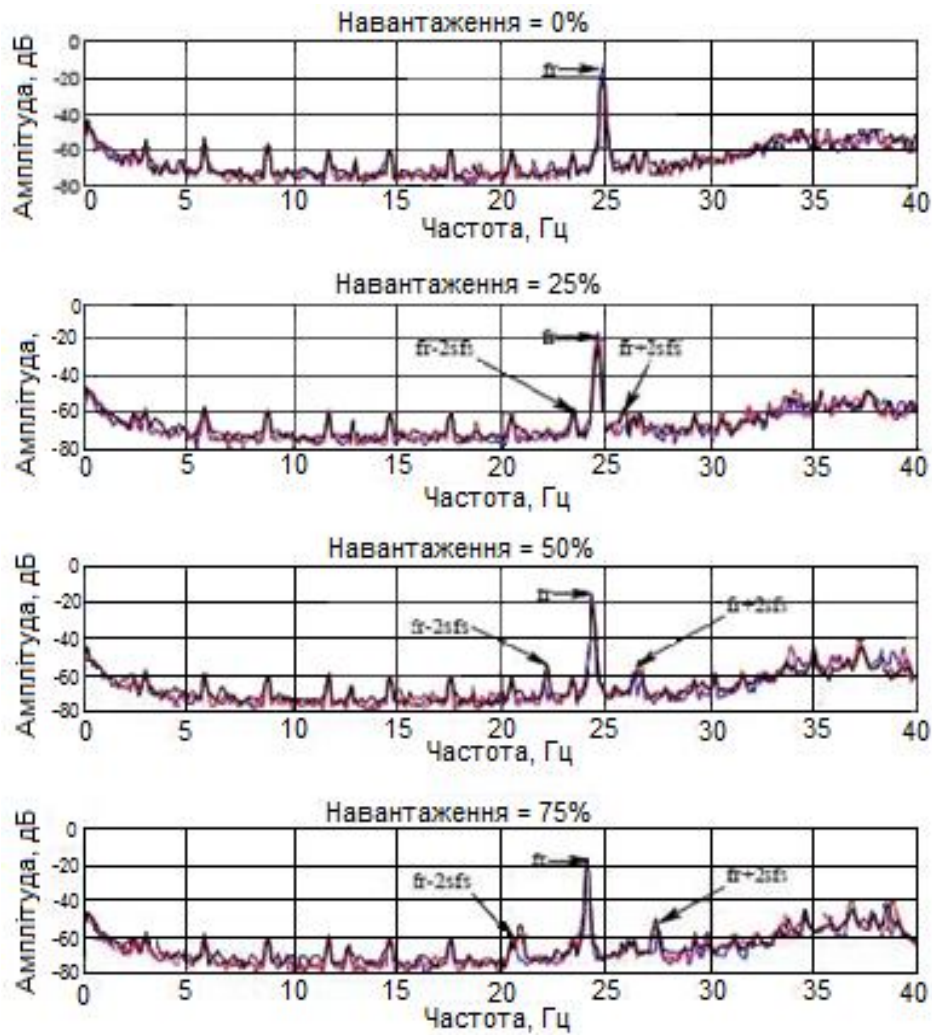


Рисунок 5.2 – Спектри вібрації асинхронного двигуна за різного навантаження

Наприклад, одним з основних параметрів асинхронного двигуна є ковзання ротора, що впливає на його потужність.

Під час діагностики параметрів АД за діагностичний сигнал приймається радіальна складова напруженості зовнішнього магнітного поля. Реєстрація її здійснюється датчиком магнітного поля, який встановлюється на корпусі електродвигуна в зоні середини довжини осердя статора. Для двигунів із числом пар полюсів більше одного проводиться перевірка достовірності визначення ковзання:

$$\left| s_{ger}^{1+} - s_{ger}^{1-} \right| \leq \left[\frac{p}{1 - \frac{1}{2(T_z F_{\partial} - i_c + 1)}} \cdot \left(\frac{1}{T_z F_{\partial} - i_c + 1} + \frac{(T_z F_{\partial} - 2i_{germax} + 1)}{(T_z F_{\partial} - i_{ger}^{1+}) \cdot (T_z F_{\partial} - i_{ger}^{1-} + 1)} \right) \right], (5.1)$$

де s_{ger}^{1+} – значення ковзання, розраховане за більшою з двох частот гармонік від ексцентриситету ротора (ГЕР) першого порядку;

s_{ger}^{1-} – значення ковзання, розраховане за найменшою з двох частот ГЕР першого порядку;

p – число пар полюсів;

T_z – час запису сигналу;

F_0 – частота дискретизації;

i_c – кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу при визначенні частоти мережі;

i_{ger}^{1+} – кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу при визначенні більшої з двох частот ГЕР першого порядку;

i_{ger}^{1-} – кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу при визначенні меншої з двох частот ГЕР першого порядку;

$i_{ger\ max}^{1+}$ – максимальна кількість ітерацій, приймається i_{ger}^{1+} , якщо

$$i_{ger}^{1+} > i_{ger}^{1-} \text{ або } i_{ger}^{1-}, \text{ якщо } i_{ger}^{1+} < i_{ger}^{1-}.$$

З погляду фізичного процесу магнітне поле в повітряному проміжку АД змінюється не строго за синусоїдальним законом. Тому струм статора і зовнішнє магнітне поле також будуть змінюватися по не синусоїдальному закону. Таким чином, при розкладанні в ряд Фур'є сигналу струму або зовнішнього магнітного поля в ньому виявляються гармоніки, що мають частоту, відмінну від частоти мережі живлення. Варто зазначити, що амплітуди цих гармонік щодо амплітуди основної гармоніки для зовнішнього магнітного поля істотно перевищують амплітуди відповідних гармонік для струму статора.

У цьому випадку визначення ковзання АД здійснюють шляхом реєстрації миттєвої величини радіальної складової напруженості зовнішнього магнітного поля в часі за допомогою датчика магнітного поля (наприклад, датчика Холла), який встановлюється на корпусі в зоні середини довжини осердя для компенсації аксіальної складової магнітного поля.

Зареєстрований сигнал, крім основної гармоніки, також містить ГЕР першого порядку, частоти яких залежать від параметрів двигуна і можуть бути визначені за таким виразом:

$$f_{ger}^{1\pm} = f_c \left(1 \pm \frac{1-s}{p} \right), \quad (5.2)$$

де $f_{ger}^{1\pm}$ – плюсова і мінусова частоти ГЕР першого порядку відповідно;

f_c – частота мережі.

Для перевірки достовірності результатів діагностування параметрів для двигунів із числом пар полюсів не менше двох визначаються умови з урахуванням точності результатів:

$$\begin{cases} \Delta f_c = \frac{f_c}{2(T_z F_\partial) - i_c + 1} \\ \Delta f_{ger}^{-1} = \frac{f_{ger}^{-1}}{2(T_z F_\partial - i_{ger}^{-1} + 1)} \\ \Delta f_{ger}^{+1} = \frac{f_{ger}^{+1}}{2(T_z F_\partial - i_{ger}^{+1} + 1)} \end{cases} \quad (5.3)$$

Для визначення максимальної похибки розглядаються всі варіанти поєднання знаків у виразах для розрахунку значень ковзання по гармонікам ексцентриситету ротора першого порядку s_{ger1}^{1+} та s_{ger1}^{1-} і визначається максимально можлива похибка як сума значень Δs_{ger1}^{1+} та Δs_{ger1}^{1-} .

Після математичних перетворень вираз (5.1) для оцінки достовірності результатів розрахунку ковзання по ГЕР визначається як:

$$\left| s_{ger1}^{1+} - s_{ger1}^{1-} \right| \leq A_{i^{1+} < i^{1-}}. \quad (5.4)$$

Отже, метод дозволяє визначати значення ковзання по ГЕР першого порядку, присутніми в зовнішньому магнітному полі, і проводити перевірку правильного визначення ковзання для двигунів із числом полюсів два і більше.

Показаний метод діагностування ковзання АД реалізується:

- за допомогою зовнішнього датчика магнітного поля (наприклад, датчика Холла), встановленого на корпусі електродвигуна в зоні середини довжини осердя статора. У цьому випадку здійснюється запис сигналу радіальної складової напруженості зовнішнього магнітного поля;

- після ціфрування сигналу формується вектор амплітудного спектра і по максимуму амплітуди радіальної складової напруженості зовнішнього

магнітного поля визначається частота мережі;

– формуються діапазони частот ГЕР, межі яких визначаються зазначень ковзань $s = 0$ і $s = 1,5s_N$, (де s_N – номінальне ковзання електродвигуна, $1,5s_N$ – максимальне значення ковзання) з урахуванням перевантаження і допустимого відхилення ковзання від номінального за номінального навантаження машини.

Перший діапазон:

– частота, що відповідає верхньої межі першого діапазону

$$f_{g1}^{1-} = f_c \left(1 - v \frac{1 - 1,5s_N}{p} \right), \quad (5.5)$$

де v – номер гармоніки;

– частота, що відповідає нижньої межі першого діапазону:

$$f_{g2}^{1-} = f_c \left(1 - \frac{v}{p} \right). \quad (5.6)$$

Другий діапазон:

– частота, що відповідає верхньої межі другого діапазону

$$f_{g1}^{1+} = f_c \left(1 + \frac{v}{p} \right); \quad (5.7)$$

– частота, що відповідає нижньої межі другого діапазону:

$$f_{g2}^{1+} = f_c \left(1 + v \frac{1 - 1,5s_N}{p} \right). \quad (5.8)$$

У цих діапазонах знаходять частоти, які обумовлені ГЕР першого порядку, що мають найбільшу амплітуду. Якщо двигун має дві і більше пари полюсів, то в ГЕР першого порядку будуть присутні дві частоти, якщо одну пару, то буде присутня тільки одна частота.

Для двигунів із двома і більше парами полюсів за двома частотами ГЕР першого порядку здійснюють розрахунок величини ковзання ротора АД з подальшим усередненням результату.

Отримані значення ковзання перевіряються за критерієм (5.4) достовірності визначення ковзання. Якщо дані критерії виконуються, то отриманий результат можна вважати правильним, інакше потрібно проводити додаткові виміри.

Для двигунів з однією парою полюсів розрахункове значення ковзання визначають по одній частоті ГЕР першого порядку. Перевірка достовірності

отриманого значення ковзання не проводиться.

Метод *акустичної діагностики* заснований на реєстрації високочастотних сигналів у металах і кераміці при виникненні мікротріщин. Частота акустичного сигналу змінюється в діапазоні 5–600 кГц. У результаті отримується сигнал, що свідчить про наявність мікротріщин у тілі об'єкта. Після закінчення розвитку тріщини він зникає. Унаслідок цього, при використанні методу, застосовують різні способи навантаження об'єктів у процесі діагностування.

Особливість методу полягає в генерації синусоїдальних електричних коливань заданої частоти, які посилюються і прикладаються до обмотки статора АД так, щоб в його обмотці статора протікав струм величиною 1 А.

З поверхні корпусу статора АД приймаються акустичні коливання, які перетворюються в електричні коливання, і після їх посилення відбувається порівняння зі сумарними синусоїдальними електричними коливаннями. У результаті визначається коефіцієнт загасання прийнятих акустичних коливань в ізоляції статора АД.

За величиною коефіцієнта загасання визначається модуль пружності просочувального матеріалу ізоляції статора АД:

$$E = \frac{\rho c \left[1 - \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]}, \quad (5.9)$$

де ρ – щільність ізоляції статора АД;

c – швидкість поширення акустичної хвилі в ізоляції статора АД;

α – коефіцієнт поглинання акустичних коливань в ізоляції статора АД;

λ – довжина хвилі акустичних коливань.

При цьому величини f та λ пов'язані між собою співвідношенням $f = c / \lambda$. Щільність ізоляції визначають зі співвідношення маси до об'єму, а швидкість як: $\rho c = z$, де z – імпеданс (акустичний опір) ізоляції, $z = p / v$ (де p – акустичний тиск, що збудований звуком, v – коливальна швидкість).

За залежностями модуля пружності від часу теплового старіння ізоляції визначаються номінальні значення модуля пружності, а потім визначаються нормовані значення модуля пружності, за яким з урахуванням режиму експлуатації АД можна визначити залишковий ресурс його роботи.

Технічний результат методу полягає в забезпеченні можливості прогнозування залишкового терміну використання АД на різних етапах експлуатації в різних умовах температури, вологості і вібрації. Це дозволяє здійснити прогнозну оцінку ресурсу роботи АД на основі прогнозування ресурсу експлуатації ізоляції обмоток.

Термографічний метод реалізується за допомогою пірометрів і тепловізорів (рис. 5.3), в яких температура у кожній конкретній точці вимірюється безконтактним способом.



Рисунок 5.3 – Термографічний метод вимірювання температури

Для отримання інформації про температурний стан пірометром сканується об'єкт та визначається температура об'єкту. Тепловізори дозволяють визначати температурне поле в певній частині поверхні об'єкта, що діагностується. Використання таких пристроїв підвищує ефективність виявлення дефектів, які зароджуються в об'єкті.

Ультразвуковий метод (рис. 5.4) використовується для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів шляхом проникнення високочастотних звукових хвиль у матеріали.

Звукові хвилі проходять через матеріал з деякими супутніми втратами енергії (загасанням) і відбиваються від поверхонь. Відбитий промінь приймається і потім аналізується, щоб визначити присутність і місце розташування дефектів.



Рисунок 5.4 – Ультразвуковий метод контролю дефектів об'єкта

Більшість ультразвукових перевірок виконані в частотах між 0,1 і 25 МГц (на багато вище амплітуди людського слуху, яка знаходиться приблизно між 20 Гц – 20 кГц).

Застосовується такий метод для пошуку дефектів матеріалу (пор, різних включень, неоднорідної структури, тощо) і контролю якості проведення робіт: зварювання, пайки, склейки, тощо. Ультразвуковий контроль є обов'язковою процедурою під час виготовлення і експлуатації багатьох відповідальних виробів.

Метод часткових розрядів застосовується для виявлення дефектів в ізоляції високовольтного обладнання (трансформаторів, електричних машин). Фізичні основи часткових розрядів полягають у тому, що в ізоляції електрообладнання утворюються локальні заряди різної полярності. При різнополярних зарядах виникає іскра (розряд). Частота цих розрядів змінюється в діапазоні 5–600 кГц, вони мають різну потужність і тривалість. Існують різні методи реєстрації часткових розрядів:

- метод потенціалів (зонд часткових розрядів Lemke-5);
- акустичний (із застосуванням високочастотних датчиків);
- електромагнітний (зонд часткових розрядів);
- ємнісний.

Для виявлення дефектів в ізоляції станційних синхронних генераторів із водневим охолодженням і дефектів у трансформаторах (наприклад, напругою 3–330 кВ) застосовується *хроматографічний аналіз*.

Для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат в ізоляції (кут між повним струмом і його ємнісної складової) високовольтного електрообладнання (трансформаторів, кабелів, електричних машин) застосовується спеціальний прилад – *міст змінного струму*. Завдяки приладу вимірюється параметр при подачі напруги від номінального до 1,25 номінального значення струму. Нормальний технічний стан ізоляції є тангенс кута діелектричних втрат, який не повинен змінюватися в відповідному діапазоні напруги (рис. 5.5).

Крім того, для технічного діагностування силового обладнання (наприклад, корпусів трансформаторів, тощо) можуть використовуватися інші методи: радіографічний, капілярний (кольоровий), вихрострумний, механічні випробування (твердометрія, розтягнення, вигин), рентгенографічна дефектоскопія, металографічний аналіз тощо.

Методи діагностування з використанням інтелектуальних систем. Наразі відомі сучасні методи діагностування з використанням інтелектуальних систем [34,35]. До них належать системи: штучні нейронні мережі, а також фазонейронні мережі.

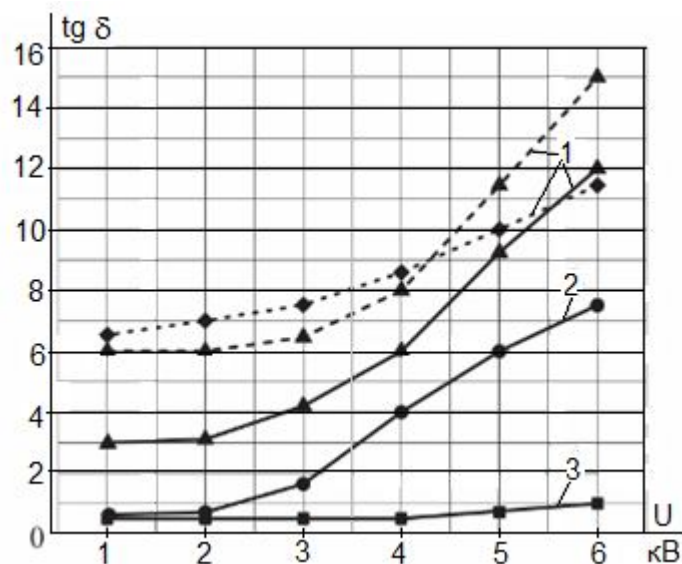


Рисунок 5.5 – Графіки зміни тангенса кута діелектричних втрат:
1 – незадовільний; 2 – задовільний; 3 – нормальний технічний стан ізоляції

Нейронна мережа – це набір нейронів, кожен із яких становить модель біологічного нейрона, зображеного на рисунку 5.6.

Нейронна мережа використовується для моніторингу стану об'єкта. Приклад схеми діагностування АД з використанням нейронних мереж подана на рисунку 5.7.

Нейронні мережі дають можливість ефективно визначати причину і види пошкодження АД. Вони працюють із використанням математичних методів щодо конкретного типу електродвигуна.

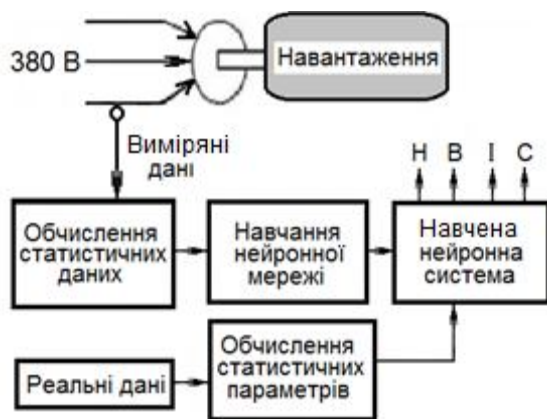


Рисунок 5.6 – Система діагностики пристрою з нейронною мережею

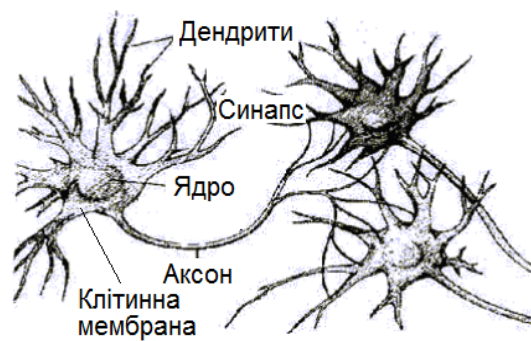


Рис. 5.7 – Біологічний нейрон

Особливістю таких мереж є відсутність застосування проміжних електронних фільтрів від перешкод або фільтрації. Штучні нейронні мережі широко використовуються в задачах прогнозування [34, 36, 37].

Наразі поширення набули математичні моделі складних нелінійних процесів, які розпізнають образи і прогнозують сигнали.

Крім вибору алгоритмів обробки сигналу і визначення способу діагностики об'єкта необхідно розробити апаратну частину програмно-апаратного діагностичного комплексу.

У реалізації програмної частини комплексу використовується метод аналізу сигналу повної споживаної потужності електродвигуна на кожній фазі штучної нейронної мережі, що визначає ймовірність присутності будь-якого пошкодження як в електричній, так і в механічній частини.

Нейронна мережа прямого поширення використовується для ідентифікації залежності повної потужності від часу, або для ідентифікації спектра гармонік сигналу повної споживаної потужності на одному періоді.

Спочатку виконується визначення періоду сигналу (рис. 5.8). Це відрізок, на якому сигнал триває протягом попередньо визначеного періоду і масштабується по ширині. Значення амплітуди повної потужності нормуються щодо значення номінальної потужності електродвигуна.

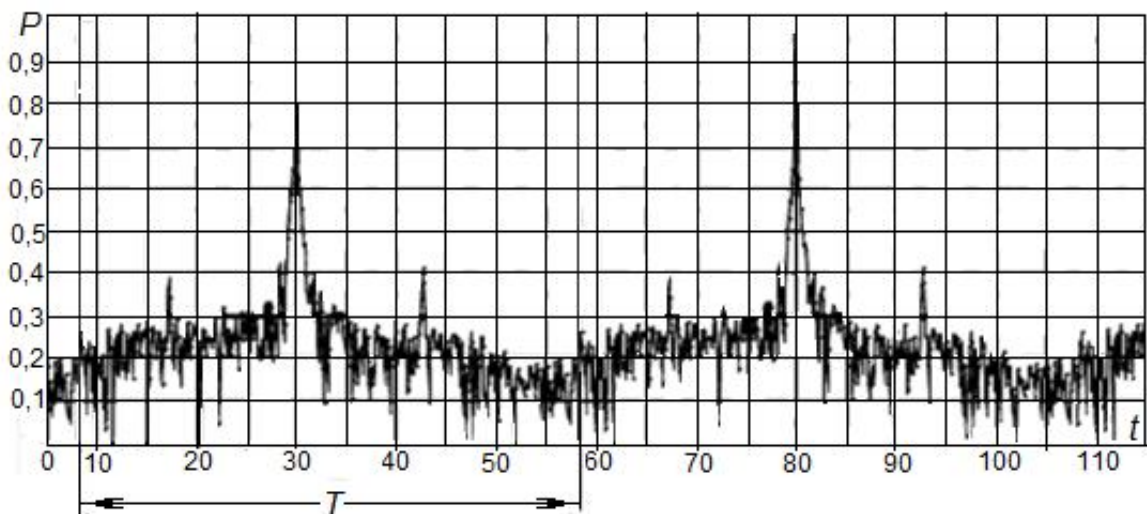


Рисунок 5.8 – Визначення періоду сигналу

Для аналізу зміни потужності двигуна отриманий графік розбивається на рівномірні проміжки, кількість яких залежить від швидкодії вимірювального пристрою і частоти обертання ротора електродвигуна.

Для використання нейронної мережі прямого поширення при вирішенні конкретної задачі, її необхідно спочатку «навчити» (рис. 5.9).

Для цього на вхід нейронної мережі подаються будь-які значення, а на виході знімаються результуючі значення, які порівнюються з тими значеннями, що повинні там бути. Якщо вихідні значення нейронної мережі відрізняються від необхідних значень, то відбувається оптимізація ваг

нейронної мережі будь-яким із математичних алгоритмів до того часу, поки ці значення не будуть їм відповідати з заданою точністю. Після цього нейронну мережу можна вважати навченою [38, 39].

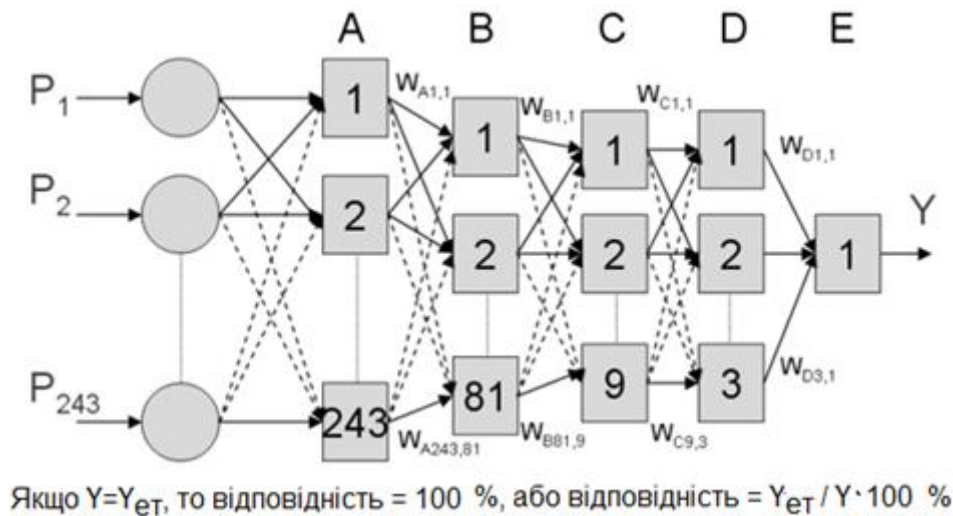


Рисунок 5.9 – Структура штучної нейронної мережі, що використовується для ідентифікації сигналу повної споживаної потужності

Під час навчання нейронної мережі на виході використовується певне еталонне значення $Y_{ет}$, відповідне конкретному виду несправності електродвигуна і еталонні експериментальні значення сигналу повної споживаної потужності дослідного електродвигуна, що отримані за допомогою того ж вимірювального пристрою. Після ідентифікації сигналу вже навченої мережі проводиться перевірка відповідності значення Y на виході мережі значенням $Y_{ет}$, яке задавалося під час навчання. Якщо $Y = Y_{ет}$, то це означає, що в електродвигуні на 100 % є несправність, для якої навчалася ця нейронна мережа. В іншому випадку проводиться оцінка ступеня відповідності з поступовим зниженням за формулою (див. рис. 5.9).

Виявлена несправність обирається за відповідністю найбільшому ступеню. За ступенем відповідності для інших несправностей електродвигуна можна міркувати про ймовірність їхньої присутності. У найбільш складних випадках, можливо, доведеться використовувати експертну систему з набором правил нечіткої логіки, які будуть визначатися в ході експериментальних досліджень.

За допомогою нейронної мережі виконуються також прогнозування пошкоджень елементів в електродвигуні. Апаратна частина комплексу, структура якої зображена на рисунку 5.10, складається з 10 блоків. З яких 7 блоків є однаковими вхідними блоками, а 3 інших блоків є основними [40].

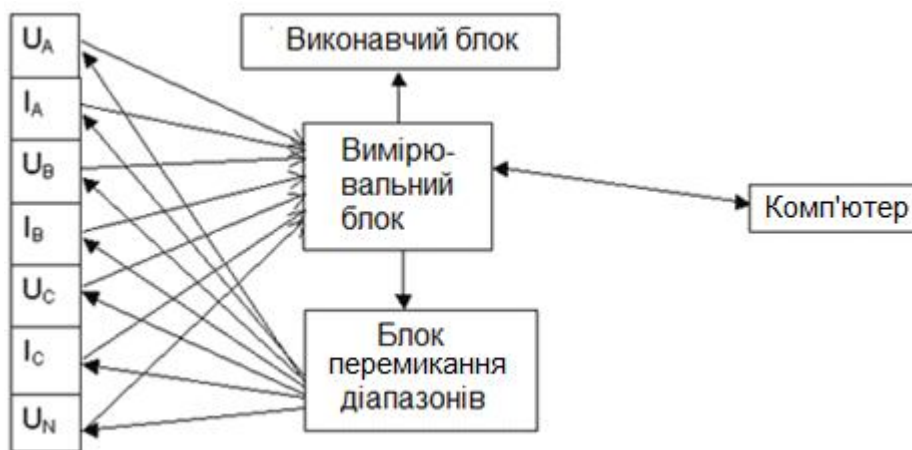


Рисунок 5.10 – Структура апаратної частини діагностичного комплексу

Головний блок пристрою (вимірювальний) – виконує функції вимірювання вхідного сигналу, керуванням блоком перемикання діапазонів та виконавчим блоком, а також обміном інформацією між комп'ютером і пристроєм.

Вхідні блоки використовуються для масштабування вхідного вимірюваного рівня напруги і для її зміни в межах 0–5 В. Кожен вхідний блок підтримує роботу в трьох діапазонах напруги (від 0 до 100 В з точністю 0,1 В, від 10 до 1 000 В з точністю 1 В і від 100 до 10 000 В з точністю 10 В).

Для автоматичного вибору поточного вимірювального діапазону напруги використовується блок перемикання діапазонів, який керує вхідними блоками й отримує команди на перемикання від вимірювального блока.

Виконавчий блок використовується для керування роботою електродвигуна або для сигналізації на поломки електродвигуна.

Використовувати нейронні мережі для визначення всіх видів несправностей і ненормальних режимів роботи електродвигуна недоцільно, а в деяких випадках неможливо. Наприклад, неможливо визначити наявність рівномірного перевантаження електродвигуна лише за формою сигналу повної його потужності, тому що необхідно порівнювати амплітуду потужності електродвигуна з його номінальною потужністю. Проте це можливо реалізувати в програмі. Якщо програмно-апаратний комплекс буде використовуватися не тільки для діагностики, але і для захисту електродвигуна, то реалізація в ньому традиційних методів релейного захисту підвищить надійність його роботи.

Таким чином, для створення діагностичних пристроїв і програмно-апаратних комплексів бажано використовувати штучні нейронні мережі, тому що вони є потужним засобом розпізнавання і прогнозування сигналів. Їх здатність до навчання дає можливість розробляти адаптивні системи

захисту і діагностики електродвигунів.

Метод діагностування ЕМС з використанням програмно-апаратного комплексу [26–29]. Сучасні електротехнічні засоби, що базуються на використанні програмованих мікроконтролерів, дозволяють найбільш гнучко реалізувати захист і функціональну діагностику об'єктів (наприклад, АД) по їх електричним параметрам.

Найбільш вдалим методом є використання програмно-апаратного комплексу (рис. 5.11), що складається з комп'ютера і цифрового пристрою-посередника, який проводить необхідні вимірювання і передає їх у комп'ютер.

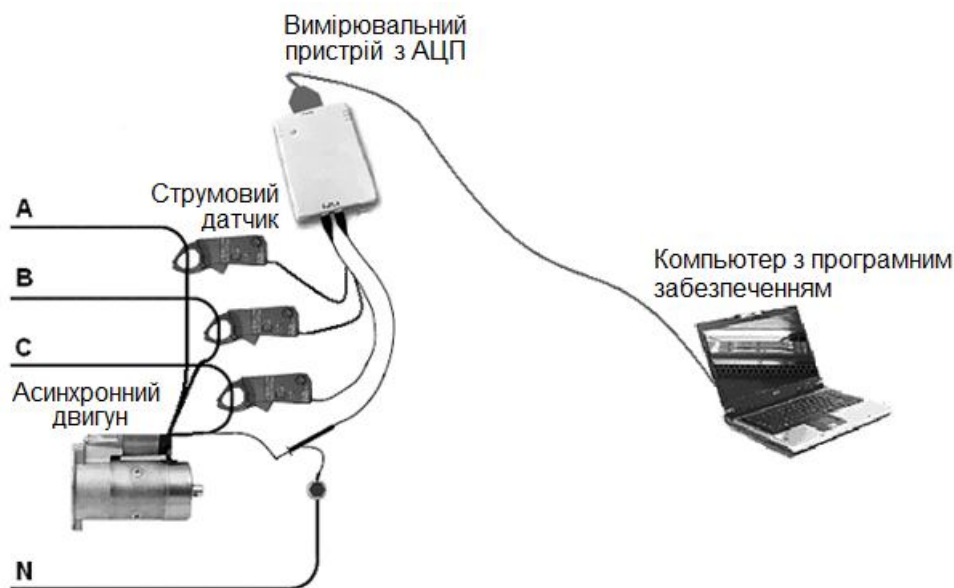


Рисунок 5.11 – Діагностичний програмно-апаратний комплекс [26–29]

Вимірювальними електричними величинами можуть бути оперативний струм, споживана потужність тощо. Програма, яка виконується на комп'ютері, обробляє вхідну інформацію і визначає найбільш ймовірний вид пошкодження працюючого пристрою, а також робить висновок про його справності. Цей метод найбільш ефективний, оскільки дозволяє зберігати на комп'ютері великі бази даних з інформацією про динаміку пошкоджень пристрою з подальшим прогнозуванням виходу його з ладу.

Крім цього, комп'ютер є більш потужним засобом обробки інформації, ніж мікроконтролер. Це дозволяє використовувати сучасні технології, зокрема і технології штучного інтелекту (нейронних мереж, нечіткої логіки і експертних систем).

Для вирішення проблем в електромехатронних пристроях використовується багато різних підходів діагностування. Наприклад, будуються апроксимаційні функції по декількох початкових точках сигналу, що відповідає конкретному виду ушкодження. У процесі діагностики

порівнюються поточні значення зі значеннями конкретної функції з певною часткою похибки. Аналізуючи форму і характеристики сигналу будь-якої з електричних величин, можна виявити пошкодження в електромеханічній частини ЕМС і розпізнати його вид.

Проте апроксимація складних нелінійних сигналів призводить до великих похибок, які посилюються додатковими перешкодами електричної мережі з підімкненням будь-якого електромеханічного пристрою. Для зменшення пошкоджуючих впливів на роботу ЕМС використовуються сучасні програмні комплекси моніторингу й оперативної діагностики (рис. 5.12), які забезпечують діагностику елементів і всього агрегату в межах декількох хвилин.

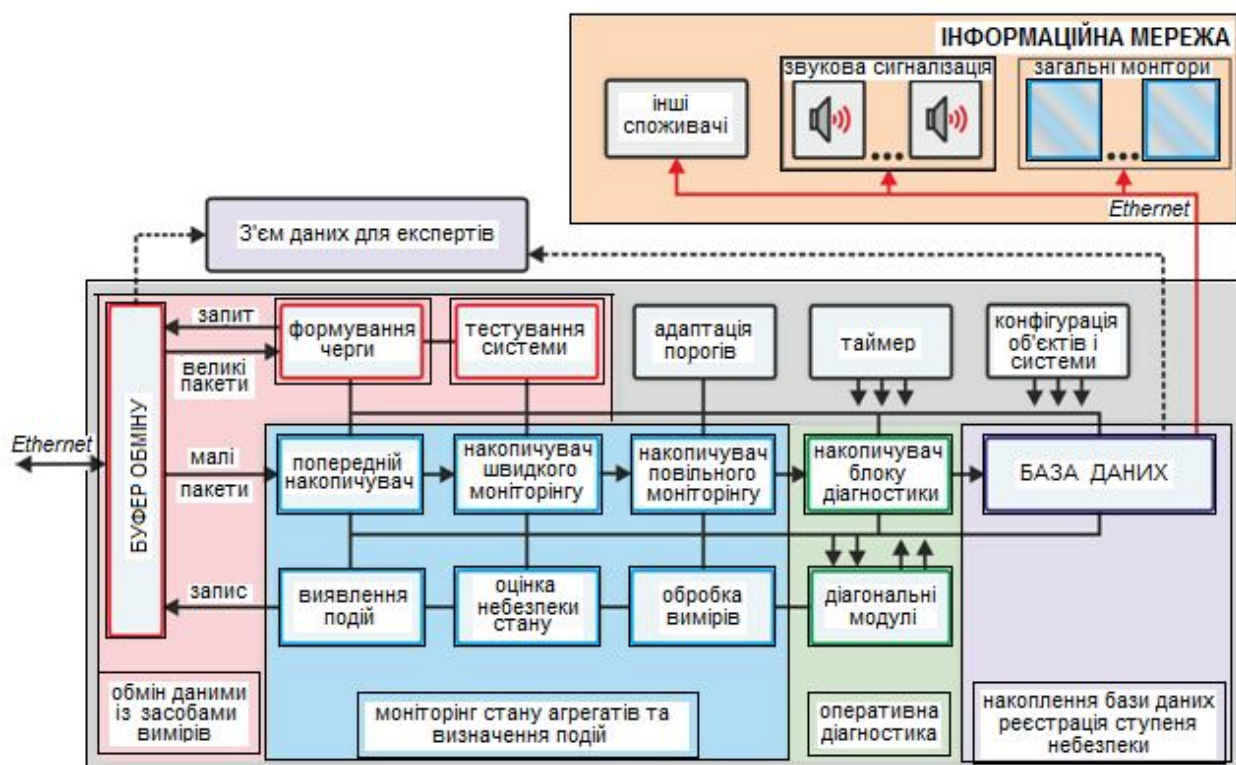


Рисунок 5.12 – Структура програмного комплексу оперативної діагностики електромехатронних пристроїв

Дані про стан елементів ЕМС виносяться на монітор комп'ютера і відразу аналізуються, порівнюються з наданням можливих результатів.

Такі програмні комплекси використовуються на великих підприємствах і охоплюють корпоративні системи керування, обслуговування, ремонт електрообладнання на підставі даних від систем моніторингу і діагностики.

Після порівняння всіх технічних, методологічних і економічних факторів можна зробити висновок, що для практичної реалізації надійної роботи ЕМС використовується широкий спектр методів діагностики.

Виявлення дефектів у працюючої ЕМС на ранній стадії їхнього розвитку не тільки попередить раптову зупинку виробництва в результаті аварії, але і значно знизить витрати на ремонт елементів ЕМС і збільшить термін їхньої експлуатації.

5.2 Засоби діагностування електромехатронних модулів і систем

Засоби та прилади для діагностування електричних систем поділяються залежно від виміру електричних і неелектричних параметрів.

Електричні вимірювання – виконують контактним (гальванічним) або безконтактним засобом із використанням перетворювачів електромагнітної енергії та електричних вимірювальних приладів (вольтметрів, амперметрів, частотомірів, осцилографів, омметрів).

Електричні вимірювання неелектричних величин – виконуються за допомогою перетворювачів неелектричної величини (впливу) щодо електричної (сигналу, параметра).

Неелектричні вимірювання – виконують за допомогою вимірювального інструмента та вимірювальних пристроїв безпосередньої оцінки (щупи, динамометри, термометри, манометри, ареометри).

Неелектричні (механічні, гідравлічні, пневматичні, оптичні) пристрої та системи діагностуються за допомогою електричних вимірювальних систем з використанням датчиків неелектричних величин.

Засоби діагностики будь-якої технічної системи [1, 3, 6] розрізняють за загальними класифікаційними ознаками: призначенням, категорією, структурою, функціональним наповненням, конструкційними атрибутами.

Функціональне призначення та категорія діагностичного засобу комплексно характеризують конструкцію або композицію, а також прив'язку засобу до об'єкта діагностики. Стосовно електромехатронних систем розрізняють декілька категорій діагностичного засобу, які підпорядковані у певний засіб.

Електричний діагностичний прилад – засіб діагностики, у якому вимірювання та реєстрація (індикація) діагностичного параметра (електричного або неелектричного) реалізується електричним способом (контактним або безконтактним).

Неелектричний діагностичний прилад – засіб діагностики, у якому вимірювання та реєстрація (індикація) неелектричного діагностичного параметра реалізується неелектричним способом за допомогою неелектричних приладів безпосередньої оцінки.

Діагностичний пристрій (ДП) – засіб діагностики, який входить до складу діагностичного приладу (стенда, комплексу) і виконує певні функції перетворення, але не має операторської периферії (органів керування та індикаторів).

Діагностичне обладнання – засоби діагностики, які встановлюються на борту електромехатронного пристрою або інтегровані в його агрегати чи системи (наприклад, до складу транспортного засобу).

Діагностичне устаткування – засоби діагностики, які використовуються за межами електромехатронного об'єкта.

Діагностична установка – засіб діагностики, за допомогою якого активізується (стимулюється) об'єкт діагностики з метою проведення перевірок.

Діагностичний стенд – стаціонарне конструктивне та функціональне поєднання діагностичної установки й діагностичних приладів.

Діагностична система – засіб діагностики, у якому реалізоване поєднання діагностичного обладнання та обладнання на функціональному (програмному) і апаратному рівні.

Діагностичний комплекс – функціонально пов'язане діагностичне устаткування, до складу якого входять діагностичні стенди та прилади різного призначення (діагностичні пости, лінії).

На етапі розробки конструкції засобу діагностики обраної категорії визначають і узгоджують конструкційні атрибути майбутнього виробу.

Приклад використання засобів діагностики модульних систем автомобілю зображений на рисунку 5.13.

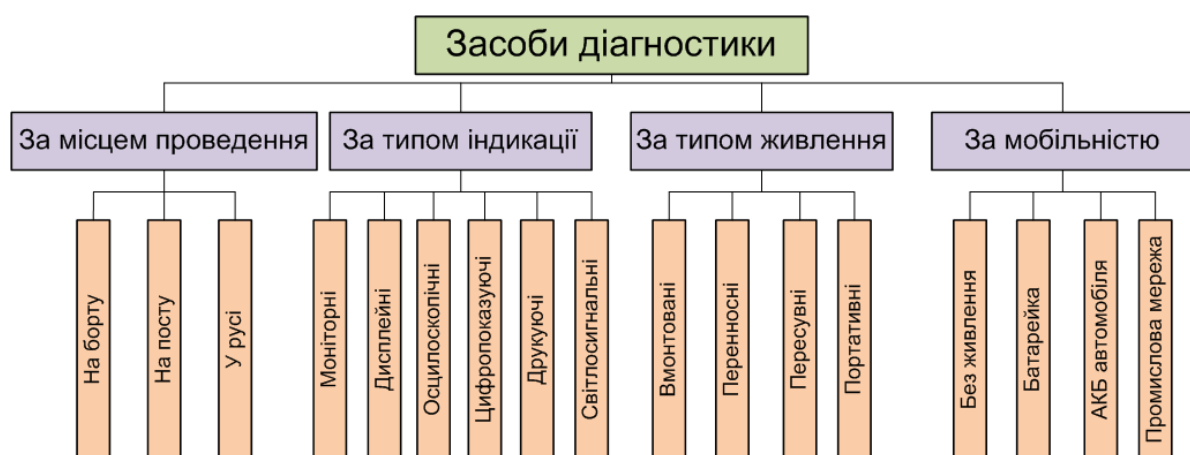


Рисунок 5.13 – Конструкційні атрибути засобів діагностики [1]

При цьому визначається прив'язка до борту автомобіля, мобільність, тип індикації, тип живлення обирається конструктивний прототип (аналог попередньої модифікації або базовий зразок) [1, 3, 6].

Синтез конструкції та схемного рішення засобу діагностики починають із вибору типу живлення, класу мобільності і виду індикації з огляду на умови (місце) проведення діагностичних операцій.

Відмінною рисою сучасних діагностичних приладів є використання мікропроцесорних пристроїв. Це розширює процеси діагностування з визначенням результатів на дисплейних засобах індикації, що знаходяться в структурі приладу.

Різні методи діагностики використовують універсальні засоби комп'ютерної техніки (монітор, клавіатуру, принтер) як периферійне оточення приладу. Автономність таких приладів діагностики надає унікальну можливість визначати результати досліджень під час діагностування систем за різних умов.

5.3 Структура діагностичних систем

Побудова діагностичного прогнозу, розвиток транспорту, машинобудування, промисловості тощо, а також вибір основних тенденцій та стратегій концентрується на:

- інтеграції технологій і знань;
- інтелектуалізації виробничих технологій;
- електромехатронних технологіях машин і роботів;
- наскрізних інформаційних системах тощо.

Системний підхід диктує нові вимоги щодо вбудованих механічних і гібридних компонентів, визначення їхніх параметрів та характеристик. Це веде до розвитку нових технологій і конструкторських рішень, наприклад, у сфері енергетики та електромеханіки.

Діагностичні системи залежно від рівня керованості можуть бути виконані як неавтоматичні, *автоматизовані* (керування процесом) або *автоматичні* (керування системою). Для реалізації автоматизованого чи автоматичного процесу діагностування зазвичай використовують комп'ютеризовані або комп'ютерні діагностичні системи [1, 5–7].

Некомп'ютерна діагностична система не виключає застосування персонального комп'ютера оператором із метою отримання довідкової діагностичної інформації про об'єкт діагностики, а також занесення та обробки результатів діагностування. Разом із тим персональний комп'ютер

не має безпосереднього інформаційного зв'язку з засобами та об'єктами діагностики, наприклад, автомобільної системи (рис. 5.14, а).

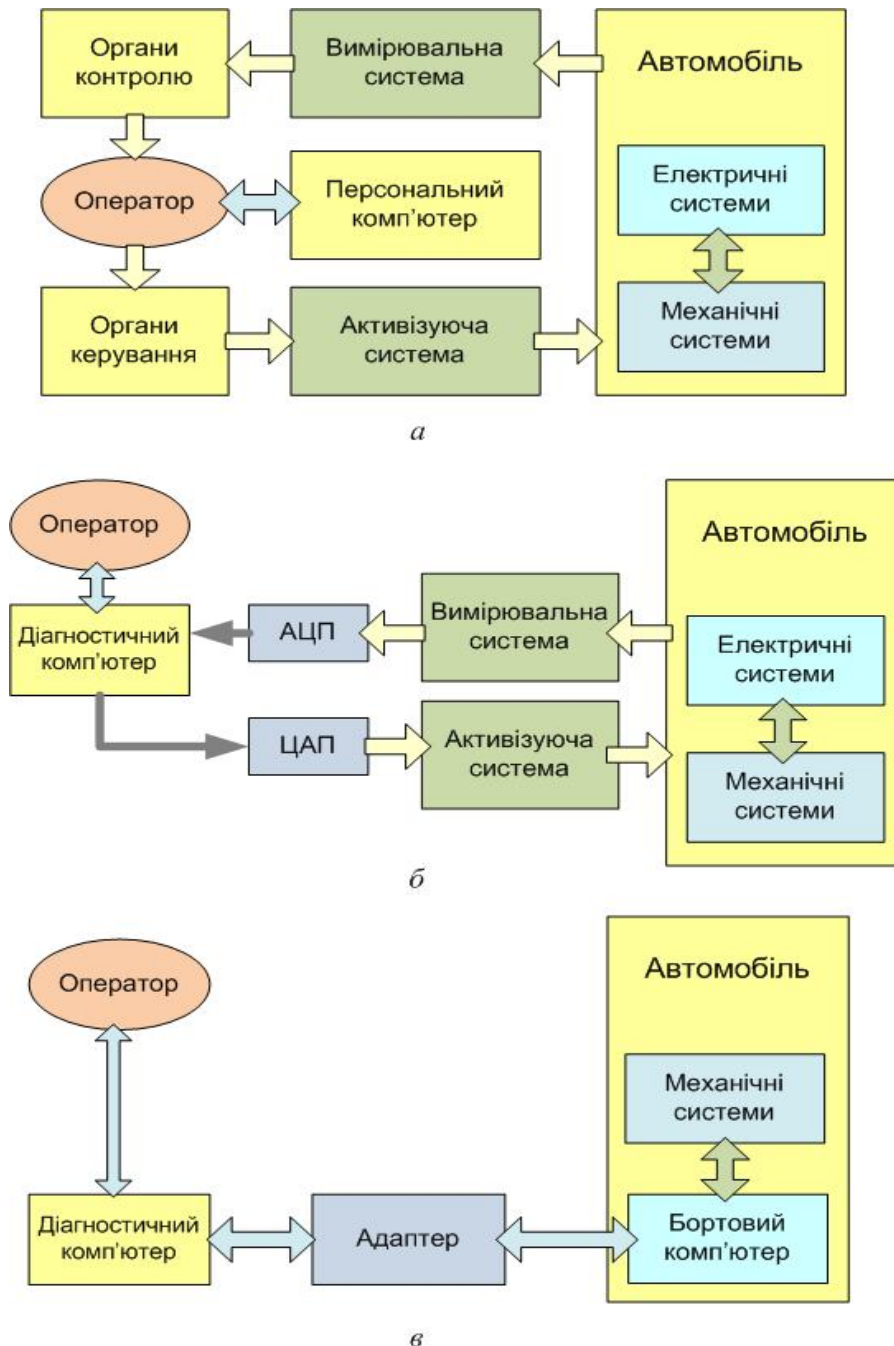


Рисунок 5.14 – Узагальнені структури діагностичних систем [1]:
а – некомп'ютерної; б – комп'ютеризованої; в – комп'ютерної

Комп'ютеризована діагностична система передбачає застосування у своєму складі інформаційно-комп'ютерних засобів для отримання результатів про технічний стан об'єкта діагностики.

У таких системах програмно-апаратні засоби системи (давачі, актуатори, перетворювачі сигналів, комп'ютери) цілком розташовані за межами електромехатронної системи.

Загалом, комп'ютеризована система створюється на базі звичайної електромеханічної діагностичної системи шляхом її комп'ютеризації та цілком підпадає під категорію «діагностичне устаткування» (рис. 5.14, б).

Для узгодження цифрових сигналів діагностичного комп'ютера з електромеханічними перетворювачами діагностичної установки використовуються ЦАП.

Для вимірювання аналогових сигналів електричних приладів вимірювальної частини системи діагностичним комп'ютером застосовуються АЦП.

Комп'ютерна діагностична система передбачає обмін інформацією між діагностичним комп'ютером зовнішнього підключення та бортовим комп'ютером, на базі якого інтегрована бортова діагностична система. У таких системах головні діагностичні функції реалізуються на базі елементів, наприклад, штатного обладнання автомобіля (рис. 5.14, в).

У такому разі діагностична система за категорією засобу поділяється на «діагностичне обладнання» і «діагностичне устаткування». Діагностичний комп'ютер (прилад), що підключається до бортового комп'ютера зазвичай виконує тільки функції операторської периферії (клавіатури та монітора). Узгодження рівнів цифрових сигналів, утвореної у такий спосіб локальної комп'ютерної мережі, здійснюється за допомогою адаптера.

Інтегровані діагностичні системи належать до класу вмонтованих засобів діагностики, які вбудовані у електромехатронні системи на програмному та апаратному рівнях. Такі системи виконують декілька пасивних (спостереження, інформування) та активних (резервування, адаптація) функцій, реалізація яких базується на використанні експертної програми.

Експертна система (ЕС) – це програма, що використовує експертні знання спеціалістів для забезпечення ефективного рішення неформалізованих задач в інтерактивному режимі [1, 6–10].

Неформалізовані задачі мають певні ознаки:

- завдання не можуть бути задані в числовій формі;
- мету не можна виразити в термінах точно визначеної цільової функції;
- не існує алгоритмічного рішення задачі;
- наявність ознак помилковості, неоднозначності й суперечливості вихідних даних.

Функціонування ЕС базується на використанні знань, а маніпулювання ними здійснюється на базі евристичних правил, які сформовані експертом. Експертні системи видають поради, проводять аналіз, виконують класифікацію, дають консультації та ставлять діагноз. На відміну від звичайних програм, які використовують процедурний аналіз, ЕС вирішують задачі у вузькій предметній сфері на основі дедуктивних міркувань.

Окрім функціонального призначення, ЕС класифікують за декількома структурними ознаками [1, 7, 8]:

- способом формування рішення (аналізувальні або синтезувальні);
- часового обліку (статичні або динамічні);
- видів даних та знань (детерміновані або невизначені);
- кількістю джерел знань.

Під час розробки ЕС для певних предметних сфер використовують існуючі програмні оболонки:

- 1) SHELL – базовий елемент операційної системи, що визначає інтерпретацію команд і дій користувача;
- 2) CLIPS – система, що використовує висновок від фактів до мети;
- 3) DYNACLIPS – включає дошку оголошень, механізм динамічного обміну знаннями та інструментальні засоби для CLIPS;
- 4) FuzzyCLIPS – використовується для представлення та управління нечіткими фактами та правилами, має дві базисних концепції про неточність, нечіткість і невизначеність;
- 5) OPS5 – містить механізми подання знань та управління, дає змогу програмісту використовувати символи та представляти відношення між символами, за правилами, які пропонує програміст;
- 6) WindExS – повнофункціональна ЕС на базі Windows; містить механізм логічного висновку, диспетчер файлів, інтерфейс користувача, адміністратор повідомлень та модулі бази знань; підтримує висновок від фактів до мети та графічне представлення бази знань;
- 7) RT-EXPERT – експертна система загального призначення, що дає змогу програмістам інтегрувати правила експертної системи в прикладні програми.

Оснoву ЕС становить *база знань* (формалізовані емпіричні знання), яка призначена для зберігання довгострокових даних, що описують об'єктну сферу та правила доцільних перетворень даних цієї області.

Аналіз об'єктної сфери в ЕС здійснюється шляхом вибору адекватного рішення із бази знань при надходженні *бази даних*, які визначають окремі факти, що характеризують об'єкти, процеси та явища в предметній сфері.

Наприклад, стосовно діагностики автомобіля, як об'єктної сфери розглядається електромехатронна система, а як предметна – її технічний стан. У такому разі як база знань розглядаються допустимі (еталонні)

значення діагностичних параметрів і алгоритми функціонування справної системи (далі по тексті – база даних), а як база даних – поточні (фактичні) значення діагностичних параметрів і алгоритми функціонування системи за фактом їхньої реалізації (далі по тесту – поточні дані).

Поточна інформація про стан електромехатронної системи, яка надходить та зберігається в ЕС, представляє параметри електричних величин (сигналів), які аналізуються в інтерпретованому (кодовому) вигляді шляхом порівняння (рис. 5.15) результатів.



Рисунок 5.15 – Структурна схема діагностичної експертної системи [1]

Залежно від призначення та режиму функціонування, інтегровані діагностичні системи мають різну структуру та поділяються на інформаційні і самодіагностичні системи, а також системи адаптації та резервування (рис. 5.16).

Інформаційна діагностична система (рис. 5.16, а) – інтегрована система, побудована на базі експертної системи та призначена для контролю ДП об’єкта керування. Така система виконує пасивні функції діагностики (наприклад, реєстрацію відхилень ДП за межі припустимих значень).

Сигнали давачів інформаційної системи не використовуються для реалізації процесу керування об’єктом і розглядаються тільки як діагностичні параметри. У базі даних ЕС зберігаються припустимі значення параметрів сигналів переліку давачів інформаційної системи.

Система самодіагностики (рис. 5.16, б) – інтегрована діагностична система, побудована на базі експертної системи.

Вона призначена для діагностики елементів системи керування (давачів, виконавчих пристроїв, електронних блоків керування) та виконує пасивні функції діагностики (реєстрація факту та локалізація несправності).

Інформаційні сигнали давачів і сигнали керування виконавчими пристроями системи самодіагностики використовуються для реалізації процесу керування об’єктом.

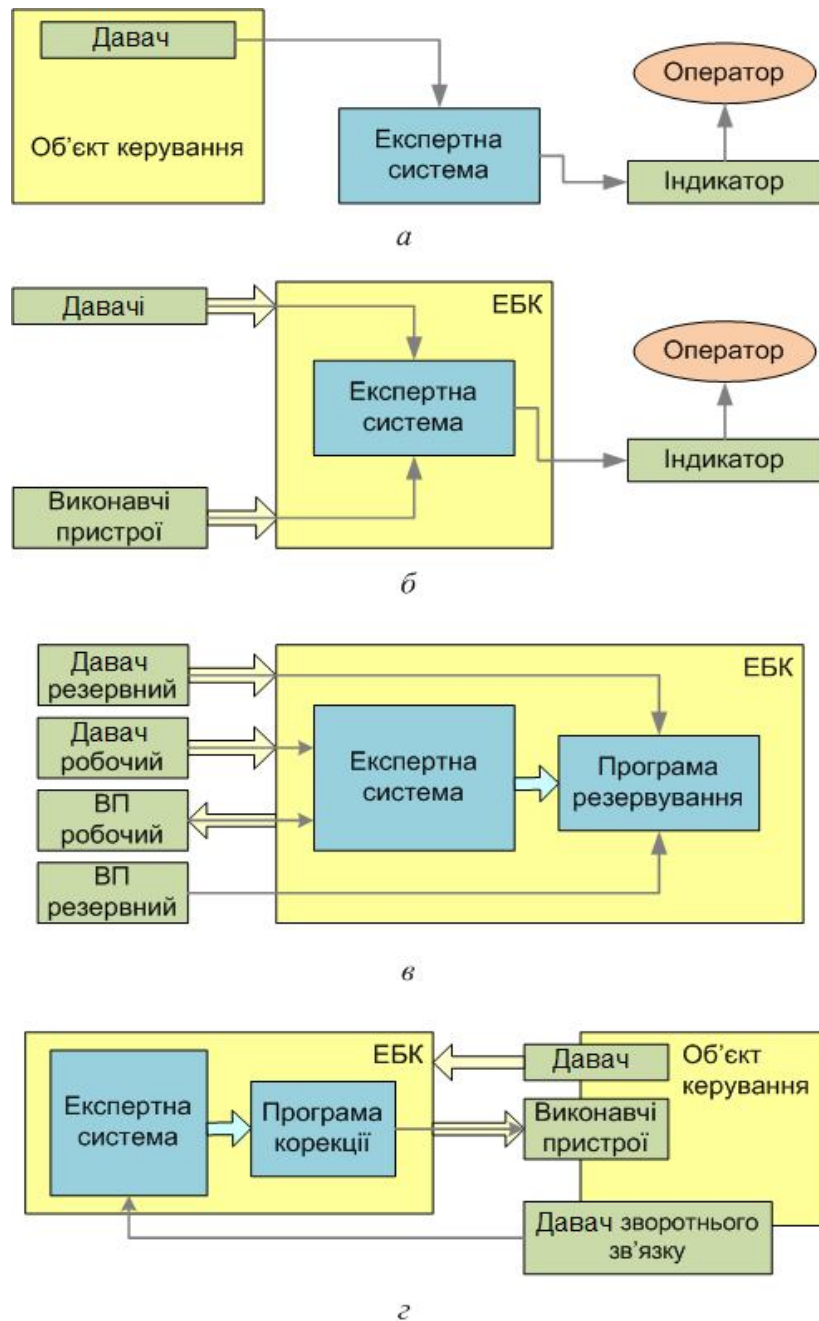


Рисунок 5.16 – Структурні схеми інтегрованих діагностичних систем:

а – інформаційна; б – самодіагностики; в – резервування; г – адаптації

ВП – виконавчий пристрій; ЕБК – електронний блок керування

Отже, режимні (робочі) сигнали системи керування (об'ємні стрілки зв'язків) одночасно розглядаються і як діагностичні параметри (тонкі стрілки зв'язків) [1].

Система резервування (рис. 5.16, в) – інтегрована діагностична система, яка побудована на базі експертної системи, що призначена для підтримки працездатності електромехатронної системи у разі виходу з ладу окремих її елементів. Система виконує активні функції діагностики (апаратну, заміна елемента або програмне заміщення сигналу). Система

резервування, як і система самодіагностики, базується на аналізі поточної інформації, що надходить із робочих сигналів системи керування.

Система адаптації (рис. 5.16, з) – інтегрована діагностична система, яка побудована на базі експертної системи. Вона призначена для підтримки оптимального керування об'єктом у разі впливу на електромехатронну систему дестабілізуючих факторів (зовнішніх, структурних) і виконує активні функції діагностики (корекцію функцій перетворення у середовищі ЕБК).

Система адаптації відтворює функції системи автоматичного керування (стабілізації вихідного параметру), де в контурі зворотного зв'язку використовується давач вихідного сигналу (параметру). Зразкове значення цього параметра зберігається в базі даних ЕС.

5.4 Засоби діагностики електромехатронних систем

Надійність роботи електромехатронних систем визначають засоби постановки діагнозу з використанням методів діагностування, що реалізуються для визначеного об'єкта.

Засоби діагностики ЕМС мають декілька ознак, які складаються з:

- перевірок технічної системи;
- визначення діагнозу пошкоджень;
- побудови діагностичної системи;
- місця та умови проведення діагностичних операцій;
- засобу діагностики, який використовується.

Приклад класифікаційної структури засобів діагностування ЕМС проілюстрований на рисунку 5.17.

Методи діагностування технічних систем за видом перевірок можна класифікувати за такими ознаками:

- характером участі людини у процесі діагностування;
- засобом виявлення несправності; засобом відтворення при перевірках методами заміни;
- типом пошуку; гнучкістю реалізації алгоритмів діагностування;
- глибиною локалізації несправності [1, 8, 9].

За характером участі людини у процесі діагностування розрізняють: *органолептичні* (суб'єктивна оцінка за ознаками та симптомами несправностей), *статистичні* (аналіз напрацьованої інформації про відмови) та *інструментальні* або *апаратні* (із використанням засобів діагностики) методи визначення технічного стану об'єкта.



Рисунок 5.17 – Класифікаційна структура засобів діагностування технічних систем [1]

Під *інструментальними* розуміють методи, у яких використовуються неелектричні засоби контролю (вимірювальний інструмент, механічне обладнання, прилади безпосередньої оцінки), а під *апаратними* – де застосовуються електричні вимірювальні прилади, які контролюють електричні та неелектричні параметри.

Сучасні апаратні методи діагностики передбачають використання спеціальних випробувальних стендів та комплексів, структура яких складається з електромеханічних приводів (актуаторів), давачів неелектричних величин, електричних засобів відображення інформації (вимірювальні прилади) та пристроїв перетворення вимірюваних сигналів до інформаційних.

Обраний параметр визначає метод постановки діагнозу (принцип побудови діагностичної системи) та, відповідно, і засіб діагностики, у якому ці функції реалізовано. До того ж усі ці позиції щодо об'єкта діагностики можуть бути альтернативними.

Відповідно структурної ознаки розрізняють комплексну діагностику за вихідними характеристиками об'єкта і функціональними параметрами, системну й агрегатну діагностику та діагностику вузлів і складальних одиниць за структурними параметрами. Залежно від цього обумовлюються місце та умови проведення діагностичних операцій.

Зазвичай комплексна діагностика проводиться на посту, системна – на борту ЕМС, агрегатна – в умовах електричної ділянки або ремонтного підприємства. Тестове діагностування проводять за статичних умов, а

функціональне – під час випробувань системи. Перевірки можуть проводитись з працюючими (активованими) або непрацюючими агрегатами та системами.

Діагностичні параметри електричних та електронних пристроїв і систем можна розділити умовно на декілька груп: постійних та діючих значень, форми і часові.

Для ЕМС здебільшого альтернативними параметрами є струм споживання, електричний опір кола живлення, напруга на ділянках кола. Для контролю цих параметрів на борту будь-якої ЕМС застосовують універсальні вимірювальні прилади.

До приладів оцінки параметрів постійних значень належать вимірювачі електричного опору R (омметри), постійної напруги U (вольтметри) та струму I (амперметри). Омметри використовуються для «холодної» перевірки кіл та дискретних елементів схеми. Вольтметри та амперметри використовують для оцінки діагностичних параметрів при ввімкнутому об'єкті діагностування. Діагностичні параметри діючих значень, до яких належать напруга змінного струму та змінний струм, вимірюють амперметрами та вольтметрами змінного струму.

Функції перелічених вимірювальних приладів зазвичай реалізовані в комбінованих приладах універсального (мультиметри) або, наприклад, автомобільного (автотестери) застосування.

Часові параметри електричних сигналів (частота f , тривалість імпульсу t та їхня шпаруватість q) дають змогу оцінити роботу задавальних, формувальних і релаксаційних кіл, а також каскадів електронних пристроїв систем керування. Такі параметри вимірюються за допомогою частотомірів та осцилографів.

Параметри форми сигналу (амплітуда, крутизна фронтів, нерівність вершини імпульсу) використовуються для оцінки значень розподілених реактивних параметрів імпульсних кіл (електронних блоків, системи запалювання тощо) і вимірюються за допомогою осцилографів.

Фазовий зсув між періодичними гармонійними сигналами однакової частоти (напруги та струму) характеризує реактивну складову опору кола змінного струму і вимірюється за допомогою осцилографів.

В імпульсних пристроях фазовий зсув періодичних сигналів взагалі розглядається як функціональний параметр.

Розглянемо особливості діагностування ЕМС і інших елементів транспортних засобів (ТЗ).

В електричних системах ТЗ застосовуються перетворювачі електричної енергії різного призначення (прилади освітлювання, нагрівачі, актуатори, тощо).

Значна увага приділяється системам ходової частини ТЗ, від яких залежить його безпека руху (гальма, кермо, підвіска). Загальний технічний стан гальмівної системи оцінюють за допомогою *деселерометрів* (вимірювачів уповільнення руху ТЗ) та *деселерографів* (реєстраторів процесу уповільнення). На постах діагностування розповсюджені *роликові стенди* (з біговими барабанами, рис. 5.18), де використовуються сили зчеплення колеса ТЗ з опорною поверхнею, та стенди, у яких гальмівний момент передається безпосередньо через колесо або через маточину [1, 7, 8, 9].

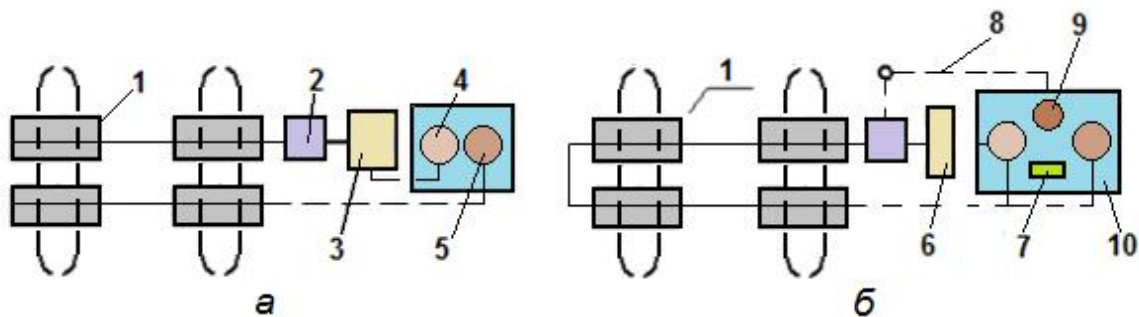


Рисунок 5.18 – Принципові схеми стендів силового типу (а) та інерційного (б):
 1 – бігові барабани; 2 – редуктор; 3 – балансирно-підвішений (гідравлічний, електричний або індукторний) пристрій навантаження; 4 – вимірник сили тяги; 5 – вимірник швидкості; 6 – інерційні маси (маховик); 7 – вимірник шляху (часу) роботи на пускових позиціях; 8 – вимірник прискорення бігових барабанів; 9 – вимірник реактивного моменту; 10 – тахометр для виміру частоти обертання бігових барабанів [1]

Для контрольно-діагностичного обстеження механічного обладнання ТЗ використовуються стенди:

- силового типу з біговими барабанами та балансирным підвішеним пристроєм навантаження (рис. 5.18, а);
- інерційний із біговими барабанами й маховиками, що імітують силу інерції поступально рухомої маси пристрою (рис. 5.18, б).

За допомогою стендів[1, 8, 9, 11]:

- вимірюються потужність, сили тяги, бічні сили, тощо;
- контролюються правильність установа керованих коліс, втрати в агрегатах трансмісії;
- визначається гальмівний момент, гальмівні сили тощо.

Діагностування органів керування ТЗ полягає у перевірках ступеня зношування й люфтів сполучених деталей, деформації важелів і тяг, порушення регулювань. Наприклад, діагностування рульового керування ТЗ

здійснюється шляхом оцінки сумарного окружного люфту (за шкалою люфтоміра) та значення сили тертя (за показаннями динамометра).

До переліку діагностичних параметрів також можна додати неелектричні параметри: сили та напрям світлового пучка головних фар, температуру нагрівальних елементів, робочі зазори тощо. До переліку методів вимірювання у такому разі потрібно додати відповідно оптоелектричні, термоелектричні, тензометричні тощо, а до переліку діагностичних приладів – реглоскоп, термометр, динамометр тощо.

Після локалізації несправної системи, пристрою або агрегата у ТЗ чи за умов статички, їх направляють на електричну ділянку для усунення несправності (технічне обслуговування та заміна структурних елементів) або для відновлення агрегата (перемотування обмоток, проточування якорів тощо).

У першому випадку застосовуються спеціальні стенди та спеціалізовані прилади агрегатної діагностики, у другому – стаціонарне промислове устаткування. Комп'ютерна діагностика електромехатронних систем під час руху та випробувань ТЗ здійснюється за допомогою портативних діагностичних сканерів.

Вибір і розробка засобів технічного діагностування здійснюється відповідно до таких факторів:

- наявності серійного випуску систем;
- масовості випуску об'єкта та його складності;
- необхідних якостей діагностичного обладнання (точності, продуктивності, надійності тощо).

Засоби технічної діагностики створюються одночасно з об'єктом.

Для складних об'єктів істотними стають проблеми підвищення контролепридатності.

Контролепридатність – властивість об'єкта, що характеризує його пристосованість до проведення контролю заданими засобами. Рівень контролепридатності об'єктів визначає ступінь ефективності вирішення завдань технічного діагностування і впливає на продуктивність процесу виробництва та якість.

Контролепридатність забезпечується шляхом перетворення структури об'єкта, що перевіряється, до вигляду, зручного для проведення діагностування. Для цього в об'єкт ще на етапі його проєктування та конструювання вводять додаткові елементи (апаратуру) – вбудовані засоби тестового діагностування. Серед вбудованих засобів тестового діагностування можна виокремити:

- додаткові контрольні точки;

– додаткові входи для блокування сигналів і завдання необхідних значень сигналів;

– апаратні засоби, які під час діагностики змінюють структуру об'єкта;

– апаратні засоби, які генерують тести й аналізують результати.

У процесі експлуатації рівень контролепридатності та витрат, що зумовлені ремонтом, визначає коефіцієнт готовності (K_g).

Коефіцієнт готовності – показник надійності ремонтованих об'єктів, що характеризує ймовірність працездатності об'єкта у довільно обраний момент часу в проміжках між виконаннями планового технічного обслуговування.

$$K_g = \frac{T}{T + T_{vp}}, \quad (5.10)$$

де T – напрацювання на відмову;

T_{vp} – середній час відновлення працездатності.

Технічні засоби для діагностики (ТЗД) складного автоматизованого технологічного обладнання залежно від призначення поділяються на вбудовані й зовнішні.

Зовнішні системи діагностики можуть бути мобільними та стаціонарними.

Мобільні засоби (пристрої) призначені для контролю параметрів і діагностування об'єктів під час приймально-здавальних випробувань, та під час експлуатації та ремонту.

Стаціонарні (стенди) використовуються переважно для дослідження та випробування об'єктів у процесі їхнього створення. Під час розробки та використання ТЗД забезпечується метрологічне обслуговування засобів, що включають перевірки (атестацію), юстування та їхній ремонт.

Юстування (від нім. *Justieren* – вивіряти, регулювати, від лат. *Justus* – правильний) – сукупність операцій із доведенням похибок засобів вимірювань, приладів, механізмів до значень, що відповідають технічним вимогам.

Функціональна діяльність ТЗД полягає у визначенні пошкоджень із заданою імовірністю, і реєстрації та прийняття рішення про відповідність або невідповідність поточного технічного стану контрольованого обладнання номінальному значенню. Найчастіше ТЗД використовуються для реалізації таких методів діагностування:

– метод тимчасових інтервалів;

– метод контрольних осцилограм;

– метод контролю параметрів.

Метод тимчасових інтервалів спрямований на контроль часу циклу роботи системи автоматизації, а також його окремих складників.

Метод контрольних (еталонних) осцилограм застосовується для діагностування складних систем автоматизації. Метод заснований на використанні графіків функцій різних параметрів у часі, на підставі аналізу яких робиться висновок про працездатність і технічний стан системи та її окремих елементів.

Метод контролю параметрів зводиться до визначення (виміру) тих або інших параметрів, перебування яких визначає працездатність системи або її окремих елементів у встановлених межах.

5.5 Сучасне обладнання діагностики електромехатронних пристроїв

Ефективність технічного діагностування рухомого складу забезпечується за допомогою пристосованості конструкції вузлів і агрегатів до діагностичного обстеження. Засоби, за допомогою яких здійснюється технічна діагностика, доцільно проєктувати паралельно з розробкою конструкцій ЕМС.

Засобами технічної діагностики є комплекс контрольних і вимірювальних приладів, а також інструментів, стендів, що забезпечують збір достатньої інформації про технічний стан контрольованого вузла або агрегату.

Засоби технічної діагностики, що відповідають вимогам, визначаються експлуатаційними підприємствами, які контролюють головні параметри, що характеризують працездатність вузла або агрегата. Програма діагностування обмежується межами експлуатаційної необхідності та складається у такий спосіб, щоб уникнути значної кількості підключень апаратів, приладів і механізмів. Трудомісткість діагностичного обстеження знижується завдяки автоматичному перемиканню, та їхньому програмуванню. Результати (інформація) технічного діагнозу отримуються у фіксованому вигляді (картограм, таблограм тощо).

Діагностування електромехатронних пристроїв може бути загальним або по елементним за всіма головними параметрами.

На цей час ідеальна повнота виявлення та глибина пошуку дефектів ЕМС виявляється сучасними засобами шляхом використання діагностичних методів моделювання поведінки системи як у справному стані, так і за наявності дефектів.

За таких випадків широко застосовується *тестове діагностування*, яке має сукупність і послідовність входних впливів. Тести пошуку дефектів

призначені для визначення місця і, можливо, причин дефектів, що порушують справність і працездатність об'єкта діагностування.

Для дискретних об'єктів тести (алгоритми) будуються за структурними або за функціональними моделями. Тести можуть бути як строго визначеними (детермінованими), так і ймовірнісними.

Засоби тестового діагностування містять дві головні частини – генератор тестових впливів і аналізатор відповідей об'єкта на тестовий вплив.

Генератор і аналізатор функціонально та конструктивно окремі один від одного. Генератор зберігає та створює (генерує) тести й подає їх на об'єкт діагностування. Аналізатор зберігає отримані відповіді, порівнює фактичні відповіді з очікуваними та видає результат (діагноз).

Іноді аналізатор становить сукупність еталона (справна копія об'єкта) і схему порівняння. Нерідко частина функцій генератора й аналізатора також покладається на людину.

У разі використання функціонального діагностування визначаються:

- конкретні функції та умови застосування об'єкта, а також його працездатність під час експлуатації;
- типи та переліки дефектів, що підлягають виявленню під час діагностування;
- розподіл завдань діагностики за періодами життєвого циклу об'єкта;
- алгоритм функціонального діагностування та його види;
- глибина функціонального діагностування;
- склад обладнання (апаратний, програмний, автоматичний або ручний, спеціалізований або універсальний, зовнішній або вбудований тощо) функціональної діагностики.

Для формування алгоритмів систем функціонального діагностування (СДФ) використовуються математичні моделі як самого об'єкта, так і його пошкоджень. Встановлюється зв'язок між ступенем розвитку пошкоджень і дефектів та поведінкою вимірюваних параметрів.

5.6 Автоматизовані діагностичні системи

У електромехатронних пристроях широко й успішно застосовуються автоматизовані електроприводи з програмним керуванням. Сучасне виробництво висуває до них необхідні вимоги, що пов'язані з надійністю роботи. Наявність таких приводів дає змогу використовувати їхні переваги й виконувати нові завдання, а також створювати ефективні технологічні машини й успішно автоматизувати різноманітні технологічні процеси.

Розглянемо приклад використання автоматизованих систем із використанням сучасних технологій.

Існує кілька типів комплектних електропневматичних позиційних приводів, призначених для застосування в різноманітних галузях промисловості та створених на базі сучасних принципів електромехатроніки. Такі приводи відрізняються компактністю, механічною міцністю, високою надійністю й великим ресурсом, здатні працювати в жорстких умовах експлуатації, володіють хімічною стійкістю. Ці властивості досягнуті внаслідок ретельного підбору, а саме:

- органічного поєднання прецизійних, пневмомеханічних, мікропроцесорних і мікроконтролерних елементів;
- застосування сучасних інформаційних і обчислювальних методів;
- використання інноваційних технологій і методів автоматичного керування.

Безперечними перевагами пропонованих електромехатронних приводів є висока гнучкість комп'ютерного управління рухом і здатність забезпечити ефективну інтеграцію приводів у складні автоматично діючі технологічні системи.

Наприклад, для жорстких умов експлуатації застосовуються позиційні приводи з пристроями дистанційного керування. Вони виконані на основі високотехнологічних і надійних пневмоциліндрів, що відповідають вимогам стандартів DIN/ISO 6431 (рис. 5.19).



Рисунок 5.19 – Електропневматичні позиційні приводи з пристроями дистанційного керування

На циліндрі розташований прецизійний давач положення та первинний перетворювач вихідного сигналу у сигнал струмової петлі. Таке технічне рішення дає змогу підвищити перешкодозахищеність приводів в автоматизованих системах [1].

Наявні мікропроцесорні пристрої керування забезпечують інтеграцію приводу або групи приводів до складу єдиної системи управління технологічними процесами, діагностики та віддалений моніторинг стану електроприводу. Водночас контролюються стан приводу, параметри значення впливу й похибки позиціонування, які для зручності використання та налаштування виводяться на цифровий індикатор або інший засіб візуалізації даних.

Можливість ефективного застосування електроприводів у складних технологічних системах підтверджена великим позитивним досвідом їхньої промислової експлуатації. Це дає змогу впевнено рекомендувати такі приводи для широкого використання в новостворених і модернізованих системах автоматизації.

Нові технологічні рішення у сфері автоматизації значно спрощують і прискорюють розробку промислових систем керування.

З використанням автоматизованої системи керування технологічними процесами створюється ієрархічне керування виробництвом, транспортом, енергетичними явищами, яке має сучасне обладнання й об'єднується з системами типу SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) або DCS (Distributed Control Systems).

Технічні вимоги до сучасних автоматизованих підсистем [1, 3–6]:

- вибір оптимального обладнання, з погляду ефективності та надійності, компактності й захищеності від зовнішніх чинників, що задовольняє міжнародним стандартам;
- забезпечення широкого температурного діапазону роботи технічних засобів локальних систем автоматичного керування;
- захист контрольно-вимірювальних та інформаційних каналів від зовнішніх впливів, а також посилення сигналів, що передаються;
- підтримка стандартних каналів обміну технологічною інформацією між окремими автоматизованими об'єктами та централізованою системою управління і контролю;
- обмін даними інформаційних каналів у реальному часі;
- забезпечення високоефективного людино-машинного інтерфейсу у системі візуалізації та моніторингу;
- ефективне, з погляду витрат часу, реконфігурування, налаштування, а також пошук і усунення пошкоджень.

На прикладі створення системи температурного контролю розглянемо головні переваги системи керування та збору даних з використанням пакета Comrapc RIO і середовища розробки Lab VIEW. Схема системи температурного контролю вентилятора наведена на рисунку 5.20 [1].

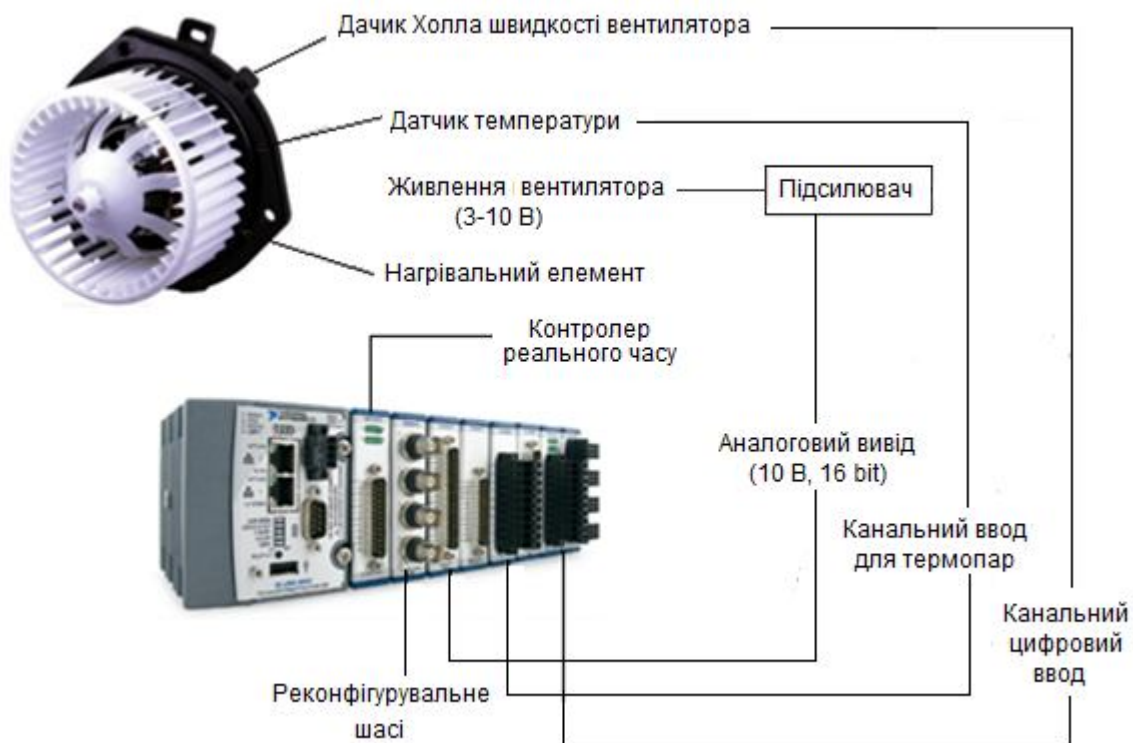


Рисунок 5.20 – Схема системи температурного контролю вентилятора

Система має контролювальний і керувальний пристрій Compact RIO, який складається з таких елементів:

- контролера реального часу на базі промислового процесора, що підтримує операції з плаваючою точкою. У контролері використовується промисловий процесор класу Pentium із частотою 200 МГц, на якому виконуються програми LabVIEWReal-TimeModule з детермінованим часом виконання операцій. Велика бібліотека функцій, що поставляється з LabVIEW, доступна для ефективної розробки власних багатопоточних контрольно-вимірювальних систем, що працюють у режимі жорсткого реального часу;

- реконфігурованих шасі із вбудованою програмованою логічною інтегральною схемою (ПЛІС) на один мільйон логічних вентилів. На базі ПЛІС розробляються власні схеми управління та збору даних із тактуванням і синхронізацією процесів. Система ПЛІС з'єднана з усіма модулями введення – виведення, встановленими в шасі, за топологією «зірка». Це забезпечує можливість прямого доступу до кожного з них, і дозволяє здійснювати їх гнучку та точну синхронізацію;

- набору модулів введення – виведення різного типу, починаючи від термопарних модулів із діапазоном вимірювання сигналів ± 80 мВ і закінчуючи 250 VAC/VDC універсальними модулями цифрового введення.

На основі показань датчиків температури та швидкості обертання вентилятора, підсистема подає необхідну (для підтримки заданої температури) напругу живлення на вентилятор.

Завдяки використанню сучасних технологій така система має значні переваги:

- компактне та візуальне відображення інформації, що підключається до CompactRIO за потребою;
- інтеграцію з бездротовими мережами Wi-Fi і Bluetooth із використанням вбудованих можливостей кишенькового персонального комп'ютера (КПК);
- доступність і універсальність обладнання (серійні КПК);
- висока ефективність (із погляду витрат часу) і відносна простота розробки додатків для КПК із використанням LabVIEWPDAmodule.

Загалом система використовує три варіанти людино-машинного інтерфейсу (рис. 5.21).

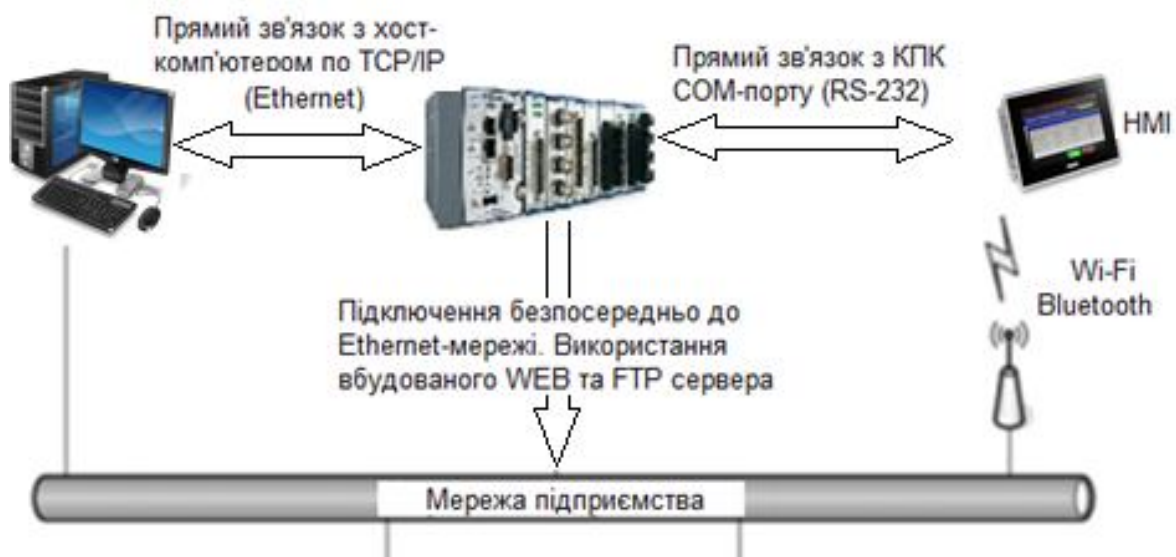


Рисунок 5.21 – Варіанти інтеграції підсистеми

Наприклад, за допомогою програмного забезпечення встановлюється регульований процес нагрівання-охолодження, що становить стандартну систему зі зворотним зв'язком.

Один із найпоширеніших алгоритмів управління такими процесами є система *PID*-регулювання (пропорційно-інтегро-диференціальне).

При цьому контролер порівнює виміряну величину із заданою. На основі різниці або «помилки», обчислюється необхідне значення керованого

параметра. Враховується також історія процесу та швидкість зміни величини помилки. Програмна архітектура підсистеми наведена на рисунку 5.22.

Керувальний алгоритм системи температурного контролю організований у циклі реального часу (рис. 5.23) і становить двоетапне *PID*-регулювання



Рисунок 5.22 – Програмна архітектура підсистеми [1]

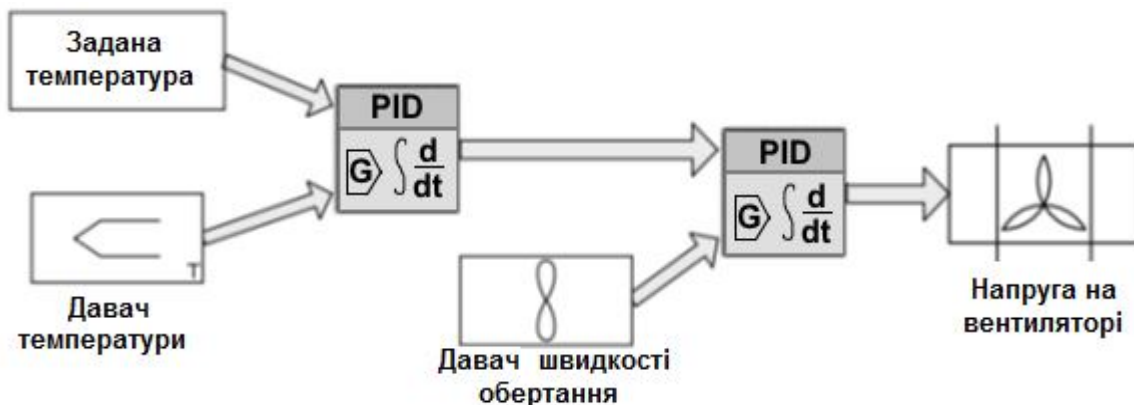


Рисунок 5.23 – Схема керуючого алгоритму [1]

На першому етапі контрольованим параметром є температура нагрівача, а керованим – швидкість обертання вентилятора.

На другому етапі – швидкість обертання вентилятора та напруга на вентиляторі.

Основний цикл виконує функції:

- організації взаємодії з людино-машинними інтерфейсами (із КПК по шині RS-232, із персонального комп'ютера ПК по Ethernet із використанням програми-клієнта на ПК, із ПК через веб-інтерфейс);

- ведення статистики та її публікація в людино-машинних інтерфейсах, а також у файлах, доступних за FTP;

– надання можливості швидкої та ефективної модифікації інтерфейсної частини програми.

Програмне середовище LabVIEW – ідеальна платформа для додатків елетромехатроніки, що дає змогу вести розробку проєктів на стику таких сфер інженерних знань, як механіка, електротехніка, електроніка, автоматичне керування та програмування вбудованих систем.

Використання LabVIEW забезпечує підвищення кваліфікації користувача в роботі з середовищем, що дає змогу оперативно й легко впроваджувати інноваційні технології протоколювання даних, бездротових вимірювань, автоматизованого тестування та інших.

LabVIEW також є графічним пакетом. Програми створюються у вигляді графічних діаграм, подібних щодо звичайних блок-схем.

Значною перевагою LabVIEW є те, що розробнику та користувачеві доступні функціонально ідентичні системи програмування для різних операційних систем.

Модульні технології обладнання та програмного забезпечення дають змогу із мінімальними витратами розробляти вимірювальні та керувальні системи різної конфігурації і складності (рис. 5.24).

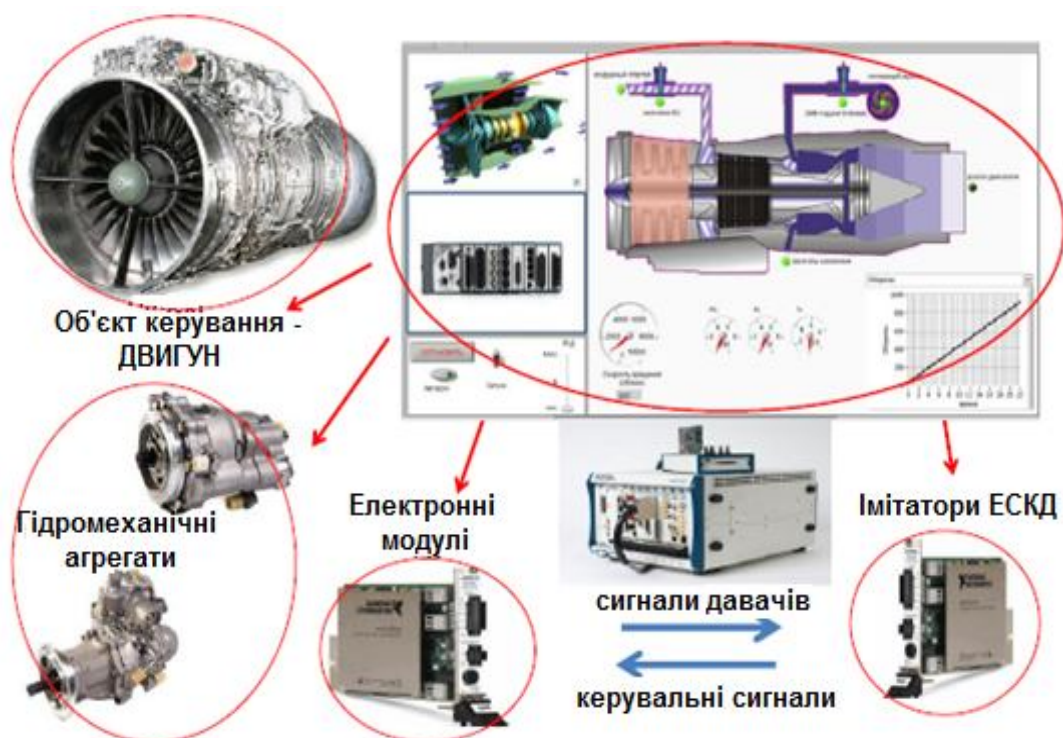


Рисунок 5.24 – Моделі систем автоматизованого керування [1]

За допомогою моделей отримується інформація про процеси, що відбуваються у системі управління під час вимірювання регульованих параметрів.

Завдяки модульним технологіям створюються робототехнічні пристрої та комплекси різного призначення з інтелектуальними системами керування.

Контрольні запитання

1. Назвіть загальні положення та методи діагностування.
2. З чого складається система технічного діагностування.
3. Порівняйте визначення «Технічна діагностика» і «Технічне діагностування».
4. Які вирішуються завдання під час використання комплексного діагностування технічного стану обладнання?
5. Проаналізуйте поняття «Тестове технічне діагностування», «Функціональне технічне діагностування». Наведіть приклади.
6. Що є «Експрес-діагностування» для обладнання сучасних транспортних засобів? Наведіть приклади та параметри.
7. У чому полягає візуально-оптичний метод діагностування?
8. Віброакустичний метод діагностування та його реалізація на практиці.
9. Наведіть приклади реалізації термографічного методу діагностування.
10. Розкрийте сутність методу часткових розрядів та способи його реєстрації.
11. Методи діагностування з використанням інтелектуальних систем.
12. Метод діагностування ЕМС з використанням програмно-апаратного комплексу.
13. Функціональне призначення та категорія діагностичного засобу.
14. Структура діагностичних систем. Засоби діагностики електромехатронних систем.
15. Технічні вимоги до сучасних автоматизованих підсистем діагностики.

6 ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ

6.1 Головні поняття та терміни теорії надійності

Питання надійності роботи ЕМС і інших систем постійно виникає під час створення нових конструкцій. Подальша їхня експлуатація може призвести до виходу з ладу елементів, що впливають на надійність роботи.

Експлуатація технічних систем, питання діагностики та надійності елементів пов'язані між собою [1, 6–8].

Теорія надійності встановлює:

- закономірності виникнення відмов у різних виробках;
- вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на процеси, що відбуваються під час їхньої роботи;
- основи розрахунку надійності та прогнозування відмов;
- способи підвищення надійності у процесі конструювання, виготовлення та експлуатації виробів;
- методи збору, обліку та аналізу статистичних відомостей, що характеризують надійність.

Основою теорії надійності є загальні поняття, з яких воно складається. Розглянемо деякі з них [1, 7, 8].

Предмет – становить сукупність математичних методів, що базуються на теорії імовірності та математичній статистиці, організаційних і технічних заходів.

Об'єкт – це предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, експлуатації, вивчення, дослідження та випробувань на надійність. Об'єктами можуть бути системи та їхні елементи (технічні вироби, пристрої, апарати, прилади, їхні складники, окремі деталі тощо). Вони можуть перебувати у різних станах та мати різні пошкодження. Під час аналізу та оцінки надійності конкретні технічні пристрої називаються узагальненим поняттям «об'єкт».

Надійність – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, яка, залежно від призначення об'єкта та умов його застосування, може містити: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережуваність або поєднання цих властивостей.

Показник надійності – кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що становлять надійність об'єкта.

Безвідмовність – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

Ремонтпридатність – властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування та ремонту.

Збережуваність – властивість об'єкта зберігати у заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції під час та після зберігання та транспортування.

У теорії надійності розрізняють безліч типів відмов (ресурсні, незалежні, раптові, поступові, експлуатаційні тощо), що впливають на працездатність елементів і конструкцій. Відмови у роботі характеризуються поняттям напрацювання за деякий період (годин, кілометраж пробігу тощо).

Ресурс – сукупне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін експлуатації – календарна тривалість експлуатації від початку експлуатації об'єкта або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Теорія надійності розглядає багато питань, що характеризують надійність роботи виробів. Головні положення теорії надійності можуть використовуватися і для нових конструкцій електромехатронних модулів, систем і комплексів.

Якість електромехатронних систем визначається сукупністю властивостей, що обумовлюють придатність та задовольняють певні потреби відповідно до їхнього призначення [6–8]. Одним із показників якості систем є показник надійності як безвідмовності, довговічності, зберігання, ремонтпридатності.

Найважливіші принципи, методи та засоби забезпечення надійності:

- вибір, удосконалення та створення нових матеріалів;
- пошук і реалізація нових фізичних принципів роботи систем автоматизації;
- реалізація нових видів енергії та засобів її перетворення;
- створення захисних умов застосування систем в умовах важких зовнішніх впливів;
- удосконалення технологій виробництва;
- застосування різних видів резервування та надмірності;
- реалізація заходів, що підвищують ефективність отримання, обробки

й використання інформації (застосування захисних і перешкодзахисних кодів, розробка якісного математичного забезпечення).

Під час визначення надійності роботи системи використовують поняття:

резервування (від лат. *reservo* – зберігаю) – метод підвищення надійності системи шляхом застосування структурної, функціональної, інформаційної та тимчасової надмірності стосовно мінімально необхідної та достатньої для виконання системою заданих функцій;

надмірність – наявність у системи можливостей понад мінімально необхідних для нормального функціонування. Під час діагностики систем необхідно вирішити питання визначення технічного стану об'єкта шляхом визначення працездатності, правильності функціонування на всіх етапах експлуатації систем.

Технічні основи надійності та діагностування пов'язані між собою та закладаються на стадії проєктування, подальшого виробництва і експлуатації.

6.2 Методи прогнозування надійності

На цей час у різних сферах науки та техніки існує досить багато методів прогнозування показників надійності, що відрізняються сукупністю розв'язуваних завдань і особливостями математичного апарату, що застосовується під час визначення параметрів.

За обсягом інформації, що використовується для прогнозу, ці методи взагалі розподіляються на групи:

- методи експертних оцінок, що застосовуються в тих випадках, коли відсутня достовірна інформація про об'єкт і дані про зміни його стану за час експлуатації;

- методи, які засновані на екстраполяції та використовуються в тих випадках, коли є достатньо повні дані, але невідомі загальні закономірності зміни стану об'єкта за час експлуатації;

- методи моделювання, які використовуються за наявності достатнього обсягу статистичних даних про зміну стану однотипних об'єктів у процесі експлуатації.

Широко використовуються під час прогнозування технічного стану об'єктів методи екстраполяції.

Основою для прогнозування технічного стану є аналітичне прогнозування, за якого за багатовимірним вектором станів $S(s_1, s_2, \dots, s_n)$ або діагностичних сигналів $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$, певних або виміряних у моменти часу

$(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k)$, необхідно визначити їхні значення в наступні моменти часу t_j ($j = k + 1, \dots, k + l$).

Аналітичне прогнозування стану технічних об'єктів ґрунтується на об'єктивному існуванні певної тенденції у зміні параметрів стану або діагностичних сигналів під час експлуатації. Головні закономірності можна охарактеризувати деякою часовою функцією. Вважається, що ця залежність, звана трендом (trend, англ. – тенденція), яка виражає усереднену в часі для певного періоду спостереження тенденцію, і може бути екстрапольована на наступні періоди часу.

Використання аналітичних методів під час прогнозування технічного стану об'єкта сприяє отриманню масиву ретроспективних значень прогнозованого параметра $X(t_i)$, а також виділенню тренда у вигляді апроксимуючої тимчасової функції і оцінці точності прогнозу.

Знаходження функції регресії $f(t) = x(t)$, що апроксимує характер зміни параметра (процесу) у часі, відіграє важливу роль у завданні прогнозування, оскільки визначає фактично результати екстраполяції тренда.

Для вибору виду апроксимуючої функції використовуються різні методи. Наприклад, широко використовується метод послідовних різниць, що визначає ступінь апроксимуючого полінома, а також критеріальні методи, що засновані на оцінці критерію близькості фактичної кривої до розрахункової.

6.3 Етапи та задачі надійності

Головним шляхом забезпечення надійності електромехатронних пристроїв та систем є підвищення якості проєктування і виготовлення. Загалом сукупність факторів надійності впливає на роботоздатність базових елементів конструкцій.

Для забезпечення необхідних характеристик ЕМС та визначення їхньої конструкційної надійності необхідно проводити попередню оцінку в три етапи. Розглянемо базові положення етапів [1, 7, 8].

На *першому* етапі проводиться розрахунок і порівняння показників надійності для різних варіантів виконання пристроїв і обирається оптимальний варіант. На цій стадії для розрахунку не потрібно ще знати точних значень показників надійності окремих елементів пристроїв, оскільки проводиться лише порівняльна оцінка розглянутих варіантів.

На *другому* етапі виконується поглиблене дослідження надійності обраного варіанта, з тим щоб забезпечити виконання заданих умов. При цьому потрібно знати точне значення показників надійності елементів.

Наприклад, виробництво сучасних електричних машин здебільшого має серійний характер, що надає машинам кожної серії значний ступінь подібності й полегшує екстраполяцію показників надійності на нові зразки. Кількісні показники надійності комплектувальних виробів мають бути видані постачальником.

Третій етап контролю надійності містить випробування дослідних зразків і порівняння результатів із розрахунковими значеннями. Результати розрахунків і випробувань дають змогу вносити відповідні корективи в конструкцію, матеріали й інші варіанти виконання пристроїв.

Найважливішими засобами підвищення надійності електромехатронних пристроїв є спрощення і мінімізація конструкцій, а також застосування якісних активних та конструкційних матеріалів.

Водночас необхідно забезпечити на належному рівні техніко-експлуатаційні показники (питомі витрати активних і конструкційних матеріалів на одиницю потужності, мінімальні габарити й вартості тощо). Ці вимоги суперечать умовам вибору засобів для підвищення надійності, тому під час проєктування електромехатронних пристроїв необхідно провести детальний аналіз усіх заходів для отримання заданої надійності. Разом із тим необхідне також ретельне проведення типових випробувань макетних і дослідних зразків на відповідність технічним вимогам за надійністю та розробка технічних умов, норм експлуатації і інших стандартних документів.

Основою теорії надійності є математичний апарат, що заснований на розділах сучасної математики: теорія ймовірностей і математична статистика, теорія випадкових процесів, теорія масового обслуговування, математична логіка, теорія графів, теорія оптимізації, теорія експертних оцінок, теорія великих систем тощо.

Завдяки теорії надійності визначаються практичні завдання, що пов'язані зі статистичною оцінкою та аналізом пристроїв, а також прогнозуванням, випробуванням і оптимізацією технічних рішень щодо забезпечення надійності у процесі проєктування, створення та експлуатації електротехнічного обладнання, установок і систем [1, 4–8].

Для визначення проблем та вирішення задач надійності роботи електромехатронних систем необхідно:

- проаналізувати фактори, що можуть впливати на негативну роботу електромехатронної системи;
- розробити математичну модель взаємозв'язку окремих явищ, що визначають виникнення пошкоджень і порушень роботи установки та її відновлення як випадковий процес;
- дати пропозиції щодо врахування надійності в моделях прийняття

технічних рішень у проєктних і експлуатаційних завданнях [1, 7].

Залежно від конструкції електромехатронних систем, або модулів і елементів, список задач дослідження параметрів надійності може бути розширеним.

6.4 Прогнозування технічного стану електромехатронних систем

Фізичні основи прогнозування технічного стану та процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів підпорядковуються певним законам, за якими можна прогнозувати зміни з певним ступенем точності.

За умовами технології виробництва технічні пристрої виготовляють із певними допусками в розмірах, та з урахуванням хімічних і структурних властивостей матеріалів.

На інтенсивність зношування деталей і вузлів пристроїв істотно впливає організація та періодичність технічного обслуговування й поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонти здійснюють нерегулярно або їх зовсім не проводять, то швидкість зношування вузлів і деталей значно збільшується. Унаслідок цього всі перелічені вище фактори впливають на імовірність прогнозування роботи обладнання [1, 9].

Існуючі методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла обладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану й зумовлені зношуванням або старінням матеріалу деталей або вузлів обладнання. Процеси зношування й старіння деталей і вузлів переважно містять детермінований (визначений) і випадковий складники. Кожен із них може мати переважний вплив для відповідного конкретного випадку, що впливає на характер процесів зношування або старіння.

Головним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів систем і агрегатів.

Ресурс – це напрацювання об'єкта від початку експлуатації або її поновлення після ремонту до настання граничного стану, коли подальша експлуатація має бути припинена, зважаючи на вимоги техніки безпеки або економічні міркування.

У техніці найчастіше для визначення ресурсу користуються такими термінами, як доремонтний, міжремонтний, залишковий і використаний ресурс.

Доремонтний ресурс характеризується напрацюванням нового обладнання від початку експлуатації до першого ремонту, а *міжремонтний* – напрацюванням між ремонтами.

Під час прогнозування визначається також *залишковий ресурс*, тобто напрацювання обладнання від моменту діагностування (контролю) до граничного стану, обумовленого технічною документацією. Використаний ресурс характеризується напрацюванням обладнання після виготовлення або ремонту до моменту діагностування (контролю).

Для орієнтовного порівняння технічного стану елементів пристрою, що діагностується, з різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнта технічного ресурсу, за допомогою якого оцінюють залишковий ресурс деталі, спряження або вузла.

Коефіцієнт технічного ресурсу (K_{tr}) для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються під час експлуатації обладнання, визначають за формулою:

$$K_{tr} = \frac{P_g + P_v}{P_g - P_n}, \quad (6.1)$$

де P_g – граничне значення параметра;
 P_v – вимірне значення параметра;
 P_n – номінальне значення параметра.

Якщо під час експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу (K_{sr}) визначається виразом:

$$K_{sr} = \frac{P_v - P_g}{P_n - P_g}. \quad (6.2)$$

Для нового елемента вузла або машини $K_{sr} = 1$, а при повному вичерпанні ресурсу $K_{sr} = 0$.

Відмова або загроза відмови зазвичай настає з пошкодження однієї-двох деталей або вузла, що зумовлено різною зносостійкістю деталей або вузлів обладнання. Конструкцією обладнання передбачається нескладна заміна деталей, які швидко зношуються. Після заміни або ремонту деталей, які вичерпали ресурс роботи, пристрій знову стає працездатним та отримує певний запас часу роботи до наступної загрози втрати працездатності.

Шляхи отримання результатів прогнозу об'єднують групи методів прогнозування:

- визначення параметрів технічного стану об'єкта;
- встановлення імовірності зміни характеристик контрольованих параметрів за певні межі;
- встановлення критеріїв працездатності або довговічності.

Відповідно використовують три методи прогнозування: аналітичний, імовірнісний і статистичної класифікації.

Метод *аналітичного прогнозування* застосовують для завдань, коли зміна контрольованого параметра інерційна у часі та всі зміни поступово накопичуються. Тоді завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції контрольованого параметра $\Pi(t)$ у минулому та теперішньому значенні функції, а також у майбутньому при визначенні моменту часу, коли параметр досягне свого допустимого значення Π_0 .

Метод *ймовірнісного прогнозування* заснований на теорії імовірності й використовується при вирішенні практичних задач діагностування.

Теорія ймовірностей вивчає закономірності випадкових явищ, що часто повторюються. Для визначення параметрів імовірнісного прогнозування використовують поняття події та формули Баєса.

Подія – це явище, що відбулося або не відбулося. Події можуть бути вірогідні або неможливі.

Імовірністю якоїсь події A називають число $P(A)$, яке характеризує можливість виникнення події. Імовірність вірогідної події визначається як $P(a) = 1$, а неможливої $p(\bar{A}) = 0$.

Ймовірність випадкової події перебуває у межах $0 \leq P(A) \leq 1$.

В інженерній практиці

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (6.3)$$

де m – кількість спроб, за яких подія A відбулася;

n – загальна кількість виконаних спроб.

За великою кількістю спроб статистична ймовірність події наближається до істинної ймовірності події.

Наприклад, необхідно визначити приблизну оцінку імовірності безвідмовної роботи 100 штук тягових двигунів типу TN-81 для двох проміжків часу: $t = 1\ 000$ і $t = 3\ 000$ год. Середньостатистична величина інтенсивності відмов у частках одиниць на одну годину роботи двигуна становить: $\lambda \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

Розв'язання. Середнє напрацювання до першої відмови двигуна визначається системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t} \\ Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ a(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \\ T_{cp} &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\}, \quad (6.4)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи двигуна;

$Q(t)$ – ймовірність відмови двигуна;

$a(t)$ – частота відмов або щільність їхньої ймовірності;

T_{cp} – середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

Кількісні характеристики надійності й інших величин технічного пристрою для експоненціального розподілу зображено на рисунку 6.1 [1, 30].

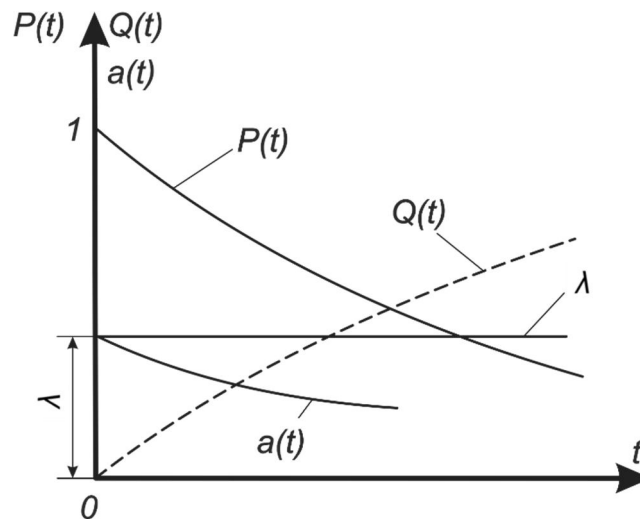


Рисунок 6.1 – Кількісні характеристики надійності технічного пристрою за експоненціальним розподілом

За інтенсивності відмов $\lambda = const$ середній час між сусідніми відмовами, або напрацювання на відмову, $t_{cp} = T_{cp}$

Ймовірність безвідмовної роботи за час роботи двигуна за $t = T_{cp}$:

$$P(t) = e^{-\lambda T_{cp}} = \frac{1}{e} \approx 0,37.$$

Ймовірність безвідмовної роботи двигуна:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}. \quad (6.5)$$

Середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} = 5 \cdot 10^4, \text{ год.}$$

Відповідно до вимог задачі імовірність безвідмовної роботи двигуна для двох проміжків часу його роботи:

$$P(1000) = e^{-\frac{1000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,02} = 0,98;$$

$$P(3000) = e^{-\frac{3000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,06} = 0,94.$$

Як показують отримані дані, надійність двигуна, що розглядається, характеризується тим, що на кожні 100 двигунів імовірність виходу з ладу на протязі вказаних двох проміжків часу роботи становить: у першому випадку 2 двигуни (2 %), у другому – 6 двигунів (6 %).

Формула Баєса дає змогу визначити імовірність поломки, наприклад вузла B_i за появи ознаки A через відому імовірність поломки вузла B_i із попередніх досліджень $P(B_i)$.

Розглянемо приклад несумісних (дві разом не відбуваються) подій B_1, B_2, \dots, B_n , що характеризують пошкодження відповідних вузлів. Вони створюють повну групу.

Припустимо, що з'являється подія A , яка характеризує пошкодження вузлів B_1, B_2, \dots, B_n .

Імовірність відмови вузлів складається з $P(B_1), P(B_2), \dots, P(B_n)$. Ймовірність появи ознаки A за несправності окремих вузлів є $P(A/B_i)$. Необхідно визначити імовірність $P(B_i/A)$ пошкодженого вузла B_i відносно інших, якщо під час експлуатації з'являється подія A .

Для розв'язання задачі розглядається імовірність одночасної появи ознаки A і пошкодження (стану) B_i .

Ймовірність одночасної появи ознаки A та події B_i визначається за формулою:

$$\begin{aligned} P(A \cap B) &= P(A) \cdot P(B/A) = P(B) \cdot P(A/B), \\ P(A \cap B_i) &= P(A) \cdot P(B_i/A) = P(B_i) \cdot P(A/B_i). \end{aligned} \quad (6.6)$$

З урахуванням (4.6) визначається:

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{P(A)}. \quad (6.7)$$

Встановимо, що імовірність події $A \in P(A)$. Оскільки ознака A характеризує пошкодження якогось вузла, то ця подія складається з логічної суми окремих подій

$$A = (A \wedge B_1) \vee (A \wedge B_2) \vee (A \wedge B_3) \vee \dots \vee (A \wedge B_n). \quad (6.8)$$

У зв'язку з припущенням, що може з'явитися тільки одна з можливих подій, отримаємо

$$P(A) = P(A \wedge B_1) + P(A \wedge B_2) + P(A \wedge B_3) + \dots + P(A \wedge B_n). \quad (6.9)$$

Повна ймовірність події A визначається з урахуванням (4.6), тобто:

$$P(A \wedge B_i) = P(B_i) \cdot P(A/B_i),$$

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(B_j) P(A/B_j). \quad (6.10)$$

Фізичний принцип (6.10) полягає в тому, що якщо система має декілька можливих несумісних шляхів переходу до іншого стану, то ймовірність переходу дорівнює сумі ймовірностей реалізації кожного з них (несумісні шляхи – такі, що не можуть реалізуватись одночасно).

З урахуванням (6.7) та (6.10) отримаємо формулу Баєса:

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A/B_j)} \text{ – формула Баєса.} \quad (6.11)$$

Знаменник рівняння (6.11) визначає суму добутку тих самих величин, але для всіх вузлів [1, 3].

Розглянемо на прикладах практичне використання формули Баєса.

Приклад 1. Імовірність безвідмовної роботи елемента $P = 0,9$. Визначити надійність (R – reliability) блоків за послідовного та паралельного з'єднань елементів.

Розв'язання:

а) логічний добуток подій A, B, C (блок працює, якщо всі елементи працюють)

$$P(R) = P(A \cap B \cap C) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C),$$

$$P(R) = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,729;$$

б) логічна сума подій A, B, C (блок працює, якщо працює хоча б один елемент):

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \cup B \cup C) = \\ &= P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(B \cap C) - P(A \cap C) + P(A \cap B \cap C). \\ P(R) &= 0,9 + 0,9 + 0,9 - 0,81 - 0,81 - 0,729 = 0,351. \end{aligned}$$

Приклад 2. Імовірність безвідмовної роботи авіаційного двигуна $P = 0,99$. Якщо літак має два двигуни, то потрібно знайти імовірність того, що не буде одночасної відмови двох двигунів.

Розв'язання:

A – безвідмовна робота першого двигуна (надійність роботи);

B – безвідмовна робота другого двигуна (надійність роботи);

R – надійність роботи двох двигунів.

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) - P(A \cap B), \\ P(R) &= 0,99 + 0,99 - (0,99 - 0,99) = 0,9999. \end{aligned}$$

Це імовірність того, що буде працювати хоча б один двигун.

Імовірність того, що не буде одночасної відмови двигунів (робота кожного з двигунів – незалежні події) визначається:

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) = P(A) \cdot P(B), \\ P(R) &= 0,99 \cdot 0,99 = 0,9801. \end{aligned}$$

Приклад 3. Відомо, що 90 % шарикопідшипників виробляють свій ресурс у справному стані. Підвищення температури мастила на 30 % від нормальної зустрічається на практиці тільки в 5 % випадків.

Визначити імовірність того, що підшипник справний у разі підвищення температури на 30 %.

Розв'язання:

A – підвищення температури на 30 % – це ознака;

B_1 – підшипник справний;

B_2 – підшипник несправний.

За формулою Баєса:

$$P(B_1/A) = \frac{P(B_1)P(A/B_1)}{P(B_1)P(A/B_1) + P(B_2)P(A/B_2)},$$

де $P(B_1) = 0,9$; $P(A/B_1) = 0,05$;

$P(B_2) = 0,1 = (1 - 0,9) = 1 - P(B_1)$;

$P(A/B_2) = 0,95 = (1 - 0,05) = 1 - P(A/B_1)$.

$$P(B_1/A) = \frac{0,9 \cdot 0,05}{0,9 \cdot 0,05 + 0,1 \cdot 0,95} = 0,32.$$

Під час вирішення завдань прогнозування методами *статистичної класифікації* (розпізнавання образів) відомі значення параметра у певні моменти часу, які зараховують до одного з класів (еталону). Після врахування закономірності зміни параметрів аналізується зміна певного параметру у майбутньому. Разом із тим розподіл значень параметрів на класи може бути часовим (за часом або напрацюванням) або параметричним (за величинами контрольованих параметрів).

Розглянемо на прикладах розрахунок параметрів надійності ЕМС.

Приклад 4. Розрахунок параметрів надійності ЕМС складається з трьох етапів:

Перший етап – розрахунок часу напрацювання на відмову для кожного елемента системи за формулою:

$$T_n = \frac{1}{\lambda_n}, \quad (6.12)$$

де n – номер елемента системи;

λ_n – інтенсивність відмов кількості елементів у системі.

Другий етап – визначення загальної інтенсивності відмов за формулою:

$$\lambda_{\text{заг}} = \sum \lambda_n. \quad (6.13)$$

Третій етап – визначення ймовірності безвідмовної роботи ЕМС протягом 10 000 годин, побудова графіка $P(t) = e^{-\lambda t}$ і визначення чисельних значень за графіком. Для рішення завдання в таблиці 6.1 знаходяться необхідні параметри 1 час напрацювання на відмову для кожного елемента системи.

Таблиця 6.1 – Час напрацювання на відмову елемента системи [30]

Номер елемента системи	Час напрацювання на відмову, год.	Примітка
1	$T_1 = 26280$, для датчиків тиску серії МЕТРАН-100	
2	$T_2 = 53000$, для датчиків температури типу ТХ 6273	
3	$T_3 = 38000$, для датчиків витрати ТХ6001	
4	$T_4 = 43800$, для датчиків горючих газів серії ТХ6383	
5	$T_5 = 45300$, для ПК	
6	$T_6 = 250000$, для шаф ЛИС-4510	
Загальна інтенсивність відмов : $\lambda_{\text{заг}} = 0,000\ 667\ 2$		

З урахуванням кількості відмов у системі та імовірності безвідмовної роботи протягом 10 000 годин будується графік залежності $P(t) = e^{-0,006672 t}$.

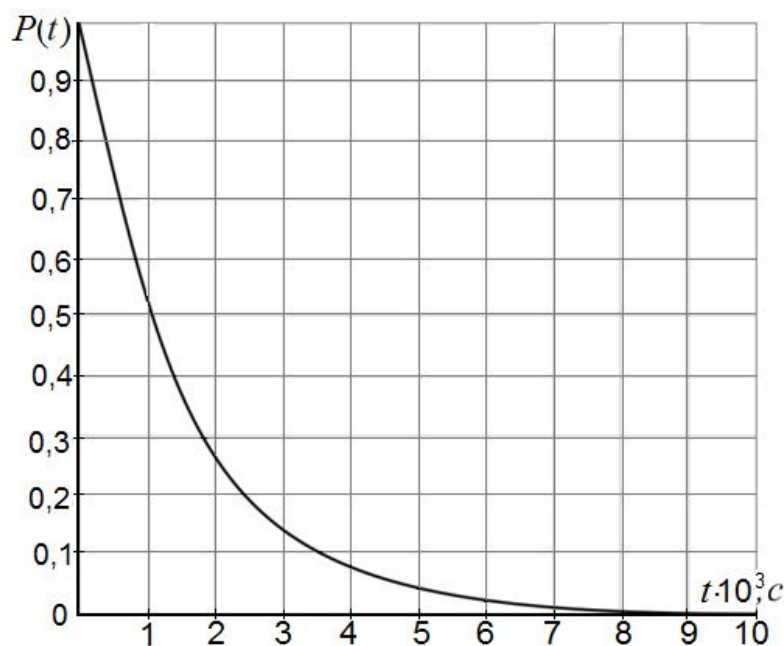


Рисунок 6.2 – Ймовірність безвідмовної роботи системи

У результаті розрахунку визначено, що система може працювати за високого ступеня ймовірності безвідмовної роботи $P = 0,9$ близько 200 годин, а чисельне значення ймовірності безвідмовної роботи після 10 000 годин становитиме 0,00125.

Однією з найважливіших інтегральних характеристик всіх типів інформації, а також програмно-технічних комплексів різного призначення є ймовірність ($P_{\text{над}}$) надійності подання.

При підготовці вихідних даних для відповідних розрахунків проводиться комплексне випробування всіх компонентів системи інформації:

- прикладних і системних програмних засобів;
- інформаційно-обчислювальної техніки і периферійних пристроїв та комунікації;
- обробки вихідних статистичних даних про напрацювання на відмову і часу відновлення.

Приклад 5. Провести оцінку і розрахунок показників надійності, що видано системою інформації, де довірча імовірність складає $\alpha = \gamma = 0,975$ (1 год). Необхідно також оцінити показники інформації, що запитуються, і визначити надійність щодо видачі вихідної i -ї інформації. Інші параметри розрахунку наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри розрахунку інформаційної смистеми

Позначення показників							
Початок, кінець роботи	Номери переривань і відновлень працездатності інформаційної системи (год., хв., с)						
	1	2	3	4	5	6	7
t_{H1}	10.00.00	10.45.00	12.12.45	12.51.57	13.58.09	15.37.13	16.57.55
t_{k1}	10.02.23	12.00.45	12.43.23	13.57.12	15.35.01	16.57.00	18.00.00
Номер s-го заміру часу обробки i-го запиту та час обробки (хв., с)							
s	1	2	3	4	5	6	
t_s	43.06	45.34	44.34	44.12	43.11	44.24	

Оцінка середнього напрацювання на відмову:

$$T_{oi} = \frac{T_{pi}}{k}, \quad (6.14)$$

де T_{pi} – сумарний час перебування системи в працездатному стані;
 k – сумарне число відмов системи ($k = 6$).

Сумарний час перебування системи в працездатному стані:

$$T_{pi} = \frac{1}{k} \sum_{L=1}^N (t_{K1} - t_{H1}), \quad (6.15)$$

де N – сумарна кількість переривань працездатного функціонування системи за період випробувань;

t_{HI} – момент часу фактичного початку роботи системи після настання $(l-1)$ -го переривання, наприклад значення 10.00.00 означає десять годин рівно;

t_{KI} – момент часу фактичного закінчення роботи при настанні переривання, наприклад значення 10.02.23 означає десять годин, дві хвилини та двадцять три секунди відповідно.

$$\begin{aligned} T_{pi} = & (10.02.23 - 10.00.00) + (12.00.45 - 10.45.00) + (12.43.23 - 12.12.45) + \\ & + (13.57.12 - 12.51.57) + (15.35.01 - 13.58.09) + (16.57.00 - 15.37.13) + \\ & + (18.00.00 - 16.57.55) = 00.02.23 + 01.15.45 + 00.30.38 + 01.05.15 + \\ & + 01.36.52 + 01.19.47 + 01.02.05 = 06.52.45 = 00.00.24765c. \end{aligned}$$

$$T_{oi} = \frac{24765}{6} = 4127,5 \text{ с.}$$

Оцінка середнього часу відновлення:

$$T_{bi} = \frac{1}{k} \sum_k t_{Bj}, \quad (6.16)$$

де t_{Bj} – час відновлення системи після j -ї відмови.

$$\begin{aligned} T_{bi} = & 0,2(00.30.24 + 00.18.45 + 00.15.41 + 00.03.12 + 00.09.00) = \\ = & 0,2(01.17.02) = 0,2 \cdot 4622 = 924,4c. \end{aligned}$$

Оцінка середнього часу реакції вхідної інформації на отримання вихідної інформації за запитом.

$$T_{reak.i} = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m t_{is}, \quad (6.17)$$

де m – кількість замірів часу обробки запитів i -го типу ($m = 6$);

t_{is} – час обробки s -го запиту на видачу вихідної інформації по i -му запиту.

$$\begin{aligned} T_{reak.i} = & 0,2(43.06 + 45.34 + 44.34 + 44.12 + 43.11 + 44.24) = \\ = & 0,2(04.23.50) = 0,2 \cdot 15890 = 3178c. \end{aligned}$$

Оцінка коефіцієнта готовності системи інформації:

$$K_{ri} = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{bi}}.$$

$$K_{ri} = \frac{4127,5}{4127,5 + 924,4} = 0.817.$$

Оцінки ймовірності надійного подання вихідної інформації запиту:

$$P_{над.і} = \frac{T_{oi}(T_{oi} + T_{bi})^{-1}}{T_{реак.і} \left[(T_{oi})^{-1} + (T_{реак.і})^{-1} \right]} = 0,463.$$

Визначення довірчих ймовірностей і межі показників надійності:

– нижня і верхня довірчі межі для показника напрацювання на відмову.

$$T_{oi}^H = r_3 T_{oi}^\gamma; \quad T_{oi}^B = r_1 T_{oi}^\gamma, \quad (6.18)$$

– коефіцієнти межі для показників напрацювання на відмову:

$$\begin{aligned} r_1 &= 2,49, \quad r_3 = 0,52, \\ T_{oi}^H &= 0,52 \cdot 4127,5^{0,975} = 1743,004с, \\ T_{oi}^B &= 2,49 \cdot 4127,5^{0,975} = 8346,305с; \end{aligned}$$

– нижня і верхня довірчі межі для показника часу відновлення працездатності системи

$$\begin{aligned} T_{bi}^H &= r_3 T_{bi}^\gamma; \quad T_{bi}^B = r_1 T_{bi}^\gamma, \\ T_{bi}^H &= 0,52 \cdot 924,4^{0,975} = 405,244с, \\ T_{bi}^B &= 2,49 \cdot 924,4^{0,975} = 1940,4962с; \end{aligned}$$

– нижня і верхня довірчі межі для показника коефіцієнта готовності системи інформації

$$\begin{aligned} K_{ri}^H &= \frac{T_{oi}^H}{T_{oi}^H + T_{bi}^B} = 0,4732; \\ K_{ri}^B &= \frac{T_{oi}^B}{T_{oi}^B + T_{bi}^H} = 0,9537. \end{aligned}$$

Нижня і верхня довірчі межі ймовірності надійного подання запитуваної вихідної інформації:

$$P_{над.i}^H = \frac{T_{oi}^H (T_{oi}^H + T_{bi}^B)^{-1}}{T_{реак.i} \left[(T_{oi}^H)^{-1} + (T_{реак.i})^{-1} \right]},$$

$$P_{над.i}^B = \frac{T_{oi}^B (T_{oi}^B + T_{bi}^H)^{-1}}{T_{реак.i} \left[(T_{oi}^B)^{-1} + (T_{реак.i})^{-1} \right]}.$$

$$P_{над}^H = 0,1678 ; \quad P_{над}^B = 0,795.$$

Таким чином, з використанням основ теоретичного синтезу систем автоматичного керування визначаються методи розрахунку параметрів надійності системи як сукупності елементів з подальшим будівництвом їхніх характеристик.

Контрольні запитання

1. Що встановлює теорія надійності та з яких компонентів вона складається?
2. Предмет та об'єкт надійності. Дайте визначення.
3. Які існують методи прогнозування надійності?
4. Проаналізувати етапи та задачі надійності.
5. У чому полягає принцип прогнозування технічного стану електромехатронних систем?
6. Обґрунтувати поняття залишкового ресурсу елементів систем і агрегатів.
7. У чому полягає особливість використання коефіцієнту технічного ресурсу?
8. Що становить поняття «подія» і як воно використовується на практиці?

7 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

7.1 Базові положення теорії моделювання

Основою традиційних електромеханічних систем є одночасна наявність таких найважливіших компонент:

- приводів, що виконують функції виконавчих елементів;
- датчиків самої різної природи, дія яких заснована на різних фізичних і хімічних законах природи;
- інформаційно керуючих модулів (регуляторів), принцип дії яких заснований на роботі напівпровідникових елементів;
- аналогової або цифрової техніці, робота яких залежить від законів математичних співвідношень і теорії автоматичного керування;
- об'єктів керування, які діють по програмах розробників цих систем і відповідних джерел енергії, що живлять датчики, приводи і регулятори.

Вся система діє в контакт з зовнішнім середовищем, яке впливає на роботу всіх інших елементів. Приклад такої системи показаний на рисунку 7.1.

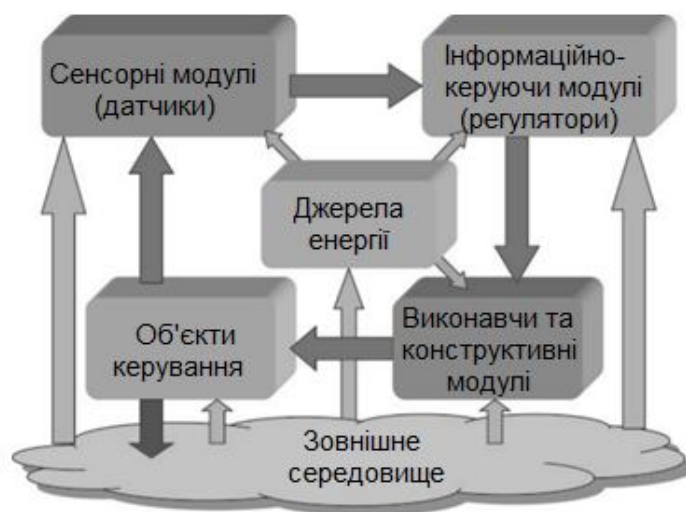


Рисунок 7.1 – Взаємодія електромеханічних систем [13]

У сучасних елементах ЕМС відбулися деякі зміни у функціональному призначенні і способі реалізації.

Наприклад, виконавчі модулі (приводи) перетворюють електричні сигнали впливу на об'єкт, тобто формують той вид впливу, який керується в певному контурі. Датчики здійснюють зворотне перетворення, а саме: вихідний сигнал об'єкта перетворюється ними в електричний сигнал.

Регулятор виповнюється як електронний модуль, що не передбачає в своєму складі механічних або оптичних компонент.

У сучасних ЕМС не вдається розділити просторово і функціонально елементи на механічні, електронні, оптичні тощо. Це є основною їх відмінністю від мехатронних систем.

ЕМС будь-якої складності є деякою сукупністю модулів, об'єднаних загальним режимом функціонування. Для того щоб дослідити її динамічні властивості, необхідно адекватним способом оцінити і проаналізувати окремі складові системи. З цією метою використовуються різні динамічні характеристики, які дозволяють також оцінити зміни процесів у часі.

Найбільш загальною формою подання математичної моделі ЕМС або окремих її складових є рівняння динаміки, які достатньо адекватно відображають властивості реальних фізичних пристроїв. Математичні моделі динаміки ЕМС засновані на спрощеннях, що передбачає відкидання деяких факторів, несуттєвих для цього завдання.

Таким чином, складання математичної динамічної моделі становить компроміс між двома суперечливими вимогами: з одного боку, вона повинна найбільш повно відповідати реальній системі, з іншого – бути достатньо простою, щоб не ускладнювати дослідження. Розглянемо найбільш поширені способи подання математичних моделей динаміки ЕМС і їхніх вузлів та елементів.

Методи математичного моделювання та проєктування ЕМС, які розробляються, повинні ґрунтуватися на єдиному, комплексному підході щодо об'єкта проєктування [1,13]. Розглянемо базові елементи моделювання.

Моделлю (від лат. *Modulus* – зразок, міра) називається елемент, що володіє основними властивостями досліджуваного об'єкта.

Моделювання як метод дослідження застосовується тоді, коли досліджуваний об'єкт із будь-яких причин частково або повністю недоступний. Така ситуація виникає у разі проєктування принципово нової техніки, оскільки для обґрунтування прийнятих проєктних рішень необхідно досліджувати систему, поки ще неіснуючу фізично.

Моделювання може бути:

- натурним, коли модель має те саме фізичне походження, що і досліджуваний об'єкт;
- аналоговим, коли модель і об'єкт мають різне фізичне походження.

Якщо властивості досліджуваного об'єкта виражені математичними співвідношеннями (рівняннями, нерівностями), то говорять про наявність *математичної моделі*.

Високий рівень розвитку обчислювальної техніки і програмного

забезпечення, досягнутий до теперішнього часу, дозволяє розглядати математичне моделювання як потужний інструмент наукових досліджень. Через те що ЕМС становлять технічно складні вироби, їхнє проєктування та підготовка до виробництва, а також значення математичного моделювання з використанням комп'ютерів, є визначальним.

Тому для ЕМС належною є САПР, яка обов'язково містить підсистему математичного моделювання динаміки. Сукупність елементів дозволяє в автоматизованому режимі розробляти моделі динаміки проєктованого виробу, проводити дослідження, вирішувати інженерні задачі оптимізації та синтезу.

У завданнях автоматизації моделювання, дослідження та проєктування електромехатронних комплексів і систем використовуються форми подання математичних моделей динаміки:

- системою диференціальних рівнянь;
- пов'язаних графів;
- структурно-динамічною схемою.

Рівняння динаміки є найзагальнішою формою подання математичної моделі ЕМС або її окремих підсистем. Вони становлять рівняння, що пов'язують координати системи, її швидкості та прискорення з діючими на систему силами. Координатами можуть бути не тільки лінійні і кутові положення ланок механічної частини машини, але й обсяги робочої рідини гідроприводу, електричні заряди, що протікають через поперечні перерізи провідників, тощо.

Силовими параметрами в рівняннях динаміки ЕМС (крім «механічних» сил і їхніх моментів відносно будь-яких вісей) можуть бути тиск робочої рідини (газу), електрична напруга тощо.

У таких випадках формування рівнянь динаміки ЕМС в узагальнених координатах здійснюється методом Лагранжа [1, 31–33], а також на основі пов'язаного графа системи, шляхом застосування до його вузлів законів Кірхгофа тощо [1, 32, 33].

Перспективним у задачах моделювання динаміки ЕМС є підхід, який полягає в тому, що динаміка виконавчого механізму (з декількома ступенями свободи в просторі узагальнених координат) представляється як точки, що зображені у рімановому просторі. У таких випадках диференціюються різноманіття, у яких дотичний простір кожної точці є кінцевомірним евклідовим простором.

Динаміка ЕМС та комплексів зазвичай характеризується нелінійними диференціальними рівняннями. Застосування ефективних методів аналізу й синтезу, розроблених у теорії лінійних систем автоматичного керування,

передбачає лінеаризацію рівнянь динаміки [13]. Лінійну модель динаміки системи можна представити у формі структурно-динамічної схеми, тобто у вигляді обмеженого набору лінійних динамічних ланок, об'єднаних у загальну структуру за допомогою прямих і зворотних зв'язків. Комп'ютерний аналіз і синтез систем автоматичного керування здійснюється на основі уявлення динаміки систем структурно-динамічними схемами. Такий принцип інтенсивно розвивався з 70-х рр. минулого століття і на цей час є поширеним та має спеціальні програмні комплекси Simulink, VisSim та інші. Суттєвими результатами, отриманими в цьому напрямку, є пакет програм ПДС (Проектування динамічних систем) [22].

Низка завдань проектування ЕМС, що мають просторові механізми з великою кількістю ступенів свободи, або управління їхнім рухом, вирішуються без складання та інтегрування складної системи рівнянь. Водночас можна обмежитись дослідженням інваріантів механічної частини (роботою узагальнених сил на малих переміщеннях, перетворенням кінетичної енергії, тощо) за допомогою тензорно-геометричного методу [13].

7.2 Елементи динаміки електромехатронних пристроїв

Для дослідження динамічних властивостей ЕМС необхідно аналізувати окремі складові системи. З цією метою використовуються різні динамічні характеристики, які дозволяють оцінити зміни процесів під час їхньої експлуатації.

Найбільш загальною формою подання математичної моделі ЕМС або окремих її складових є рівняння динаміки, які відображають властивості реальних фізичних пристроїв.

Розглянемо найбільш поширені способи подання математичних моделей динаміки електромехатронних вузлів і систем [13]. Для визначення динамічної характеристики електромехатронного модуля або системи використовуються звичайні *диференціальні рівняння*, які можуть бути представлені в тій або іншій формі. У загальному випадку вони мають вигляд:

$$y^n + a_n y^{(n-1)} + \dots + a_1 y = b_m u^m + \dots + b_0 u, \quad n \geq m, \quad (7.1)$$

де y – вихідна змінна, u – вхідний вплив, n, m – порядок об'єкта.

Оскільки це рівняння пов'язують вхідну і вихідну змінні системи, то іноді його називають рівнянням «вхід-вихід». В окремому випадку диференціальне рівняння (7.1) приймає форму:

$$y^n + a_n y^{(n-1)} + \dots + a_2 \dot{y} + a_1 y = bu. \quad (7.2)$$

Як модель лінійних багатоканальних ЕМС зручно використовувати векторно-матричну форму для змінного стану, яка представлена системою диференціальних рівнянь першого порядку (нормальна форма Коші):

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + Bu, \\ y = CX. \end{cases} \quad (7.3)$$

Для цієї форми: $X \in R^n$ – вектор стану; $u \in R^m$ – вектор керуючих впливів; $m \leq n$, $y \in R^m$ – вектор виходу; A – квадратна матриця коефіцієнтів; B і C – прямокутні матриці коефіцієнтів.

Перше рівняння (7.3) називається диференціальним рівнянням стану, а друге – рівнянням виходу. У багатьох практичних завданнях вихід – це одна або кілька змінних стану, які можна виміряти. Тому систему рівнянь виду (7.3) називають моделлю «вхід-стан-вихід».

Математичні моделі (7.1) і (7.2) також можуть бути представлені у формі (7.3) після відповідного вибору лінійно-незалежних змінних стану. Їх число завжди дорівнює порядку об'єкта (n), а вхід і вихід – це скалярні змінні ($u \in R^1$, $y \in R^1$).

Оцінювання рівняння (7.3) буде простішим, якщо як компоненти вектора стану X обираються вихідна змінна y і її похідні:

$$x_1 = y, \quad x_2 = \dot{y}, \quad \dots, \quad x_n = y^{(n-1)}.$$

У результаті замість (7.2) отримується система рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dots \\ x_n = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dots - a_n x_n + bu, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (7.4)$$

яка представлена у матричній формі:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & -a_2 & \dots & -a_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ b \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ \dots \ 0], \quad (7.5)$$

де A , B і C – матриці, що мають розмірності:

$$\dim A = n \times n, \dim B = n \times 1, \dim C = 1 \times n.$$

Варто зазначити, що перехід від моделі (7.2) або (7.1) до (7.3) не є однозначним, оскільки існує безліч лінійно-незалежних наборів змінних стану X . Водночас від вибору змінних стану властивості технічного пристрою не змінюються.

Приклад 1. Записати рівняння стану для моделі, яка представлена у формі диференціального рівняння:

$$\ddot{y} + 5\dot{y} + 3y = 4u.$$

Розглядаються два варіанти оцінювання в змінних стану.

1. Як змінні стану обирається вихідна величина і її похідна, тобто $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$. В результаті отримується так звана канонічна модель (з мінімальним числом ненульових елементів):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -3x_1 - 5x_2 + 4u, \\ y = x_1 \end{cases}$$

і матриці, що характеризують її властивості:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0].$$

2. Як нові змінні стану обираються такі лінійно-незалежні величини: $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y} + 3y$. Рівняння стану для них мають вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -3x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -12x_1 - 5x_2 + 4u, \\ y = x_1 \end{cases}$$

і відповідні матриці

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -12 & -5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0].$$

Таким чином, залежно від мети дослідження може бути прийнята за основу одна або інша форма представлення рівнянь стану об'єкта.

Поряд з вихідною моделлю ЕМС виду (7.1) її можна уявити в символічній формі з застосуванням оператора диференціювання $p = d/dt$. Це дозволяє записати диференціальне рівняння (7.1) у формі алгебраїчного рівняння:

$$p^n y + a_n p^{n-1} + \dots + a_1 y = b_m p^{m-1} u + \dots + b_0 u \quad (7.6)$$

і ввести нову динамічну модель – *передавальну функцію* як відношення вихідного сигналу до вхідного:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1}, \quad (7.7)$$

де чисельник і знаменник передавальної функції (7.7) становлять поліноми від оператора p . Функція повністю оцінює зв'язки між виходом і входом об'єкта при нульових початкових умовах, але не враховує його внутрішню конструкцію. Варто також зауважити, що вираз $y(t) = W(p) u(t)$ – це символічний запис диференційного рівняння (7.1). Таким чином, застосування оператора диференціювання дозволяє замінити рішення диференційних рівнянь алгебраїчним обчисленням.

Оскільки корені полінома чисельника $B(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$ обертають передавальну функцію в нуль, то вони називаються нулями $N = \{u, \dots, n_m\}$. Поліном знаменника $A(p) = p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1$ називається характеристичним поліномом. Його коріння обертають вираз (7.7) у нескінченність і називаються полюсами передавальної функції $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$.

З урахуванням нулів і полюсів передавальну функцію (7.7) можна записати у формі:

$$W(p) = k \frac{(p - n_1) \dots (p - n_m)}{(p - \lambda_1) \dots (p - \lambda_n)}, \quad (7.8)$$

де k – коефіцієнт посилення системи.

Передавальну функцію виду (7.6) можна також отримати за допомогою зображення Лапласа, якщо перетворити обидві частини диференціального рівняння (7.1) і знайти відношення зображень по Лапласу вихідної величини до вхідної при нульових початкових умовах. У цьому випадку передавальна функція набуде вигляду:

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1}, \quad (7.9)$$

де s – комплексна змінна.

Від оцінки в змінних стану (7.3) також можна перейти до моделі у вигляді передавальної функції (матриці) з використанням перетворення Лапласа або оператора диференціювання.

Наприклад, рівняння стану (7.3) в операторній формі набирає вигляду:

$$pX = AX + Bu, \quad (7.10)$$

що дозволяє визначити вектор стану $X = (pI - A)^{-1} Bu$ і вихідні змінні системи $y = C(pI - A)^{-1} Bu$.

Матриця взаємозв'язку між вихідними змінними і керуючими впливами в цьому виразі називається матричною передавальною функцією.

$$W(p) = C(pI - A)^{-1} B. \quad (7.11)$$

У розгорнутій формі вона набуде вигляду:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{ij}(p) & \dots & W_{1m}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{m1}(p) & \dots & W_{mm}(p) \end{bmatrix}, \quad (7.12)$$

де $W_{ij}(p) = y_i / u_j$ – скалярна передавальна функція, яка становить відношення i -го виходу до j -го входу в символічній формі при визначених нульових умовах $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, m}$.

На головній діагоналі передавальної матриці знаходяться компоненти, які називаються власними передавальними функціями каналів. Компоненти, розташовані вище або нижче головної діагоналі, називаються передавальними функціями перехресних зв'язків між каналами. Разом із тим всі скалярні передавальні функції в (7.11) містять однаковий знаменник

$$A(p) = \det(pI - A) = p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_1, \quad (7.13)$$

який є характеристичним поліномом системи.

Взаємозв'язок між параметрами періодичних сигналів на вході і виході визначають *частотні характеристики*. Якщо на вхід подавати гармонійний сигнал певної амплітуди і частоти ($u = A_1 \cos \omega t$), то на виході в усталеному режимі у стійкої системи (рис. 7.1) буде також гармонійний сигнал тієї ж частоти, але з амплітудою A_2 і зрушенням по фазі $y = A_2 \cos \omega t$.

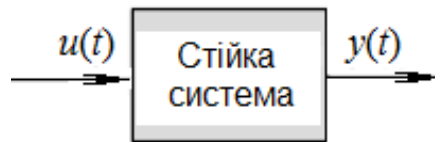


Рисунок 7.1 – Приклад проходження періодичного сигналу [13]

При заміні оператора p у передавальній функції (7.7) на $j\omega$ отримується аналітичний вираз для узагальненої частотної характеристики, яка і визначає співвідношення між вхідним і вихідним гармонійними сигналами системи:

$$W(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + \dots + b_1 j\omega + b_0}{(j\omega)^n + \dots + a_2 j\omega + a_1} \quad (7.14)$$

Характеристику також можна представити у вигляді:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = R(\omega) + jI(\omega), \quad (7.15)$$

де складові $W(j\omega)$ мають самостійне значення і назви:

$R(\omega)$ – речова частотна характеристика (РЧХ);

$I(\omega)$ – уявна частотна характеристика (УЧХ);

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{I(\omega)}{R(\omega)}$ – фазо частотна характеристика (ФЧХ), де ω певної

частоти характеризує фазовий зсув вихідного сигналу по відношенню до

вхідного. ФЧХ відображає фазові зрушення, що вносяться системою на різних частотах.

$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)}$ – амплітудно- частотна характеристика (АЧХ), яка становить собою коефіцієнт посилення гармонійного сигналу. Якщо на якійсь частоті значення $A(\omega) > 1$, то вхідний сигнал посилюється, якщо $A(\omega) < 1$, то сигнал цієї частоти послаблюється.

За формою АЧХ можна виділити такі основні типи фільтрів:

- фільтр низьких частот, який пропускає низькочастотні сигнали приблизно з однаковим коефіцієнтом посилення, але пригнічує високочастотні сигнали (шуми, перешкоди, тощо);

- фільтр високих частот, який пропускає високочастотні сигнали, проте послаблює сигнали низької частоти;

- смуговий фільтр, що пропускає сигнали певної частоти (у діапазоні від ω_1 до ω_2);

- смуговий (режекторний) фільтр, який блокує сигнали з частотами в діапазоні від ω_1 до ω_2 , а інші пропускає.

Амплітудна частотна характеристика показує, як ланка пропускає сигнали різної частоти, а оцінкою пропускання є відношення амплітуд вихідного (A_2) і вхідного сигналу (A_1).

Для зручності побудови АЧХ можна застосовувати логарифмічний масштаб і використовувати логарифмічну амплітудну частотну характеристику (ЛАЧХ):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (7.16)$$

де амплітуда вимірюється в децибелах (дБ).

Графічне представлення узагальненої частотної характеристики $W(j\omega)$ на комплексній площині при зміні ω від 0 до ∞ називається амплітудно-фазовою характеристикою (АФХ) (рис. 7.2).

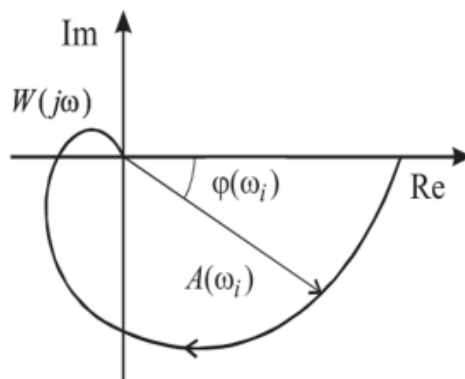


Рисунок 7.2 – Приклад амплітудно-фазової характеристики системи [13]

Крім АФХ, використовується графічне представлення на відповідній площині всіх інших частотних характеристик.

Приклад. Побудувати амплітудно-фазову (АФХ), речову частотну (РЧХ) і фазочастотну характеристики (ФЧХ) для елемента, передавальна функція якого має вигляд:

$$W(p) = \frac{10p}{p+1}.$$

Під час зміни оператора $p \rightarrow j\omega$ вираз для узагальненої частотної характеристики:

$$W(j\omega) = \frac{10j\omega}{j\omega+1} = \frac{10\omega^2}{\omega^2+1} + j \frac{10\omega}{\omega^2+1}.$$

Вирази для РЧХ і ФЧХ у вигляді:

$$R(\omega) = \frac{10\omega^2}{\omega^2+1}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega}.$$

Відповідні частотні характеристики, побудовані під час зміни частоти від 0 до ∞ , подано на рисунку 7.3.

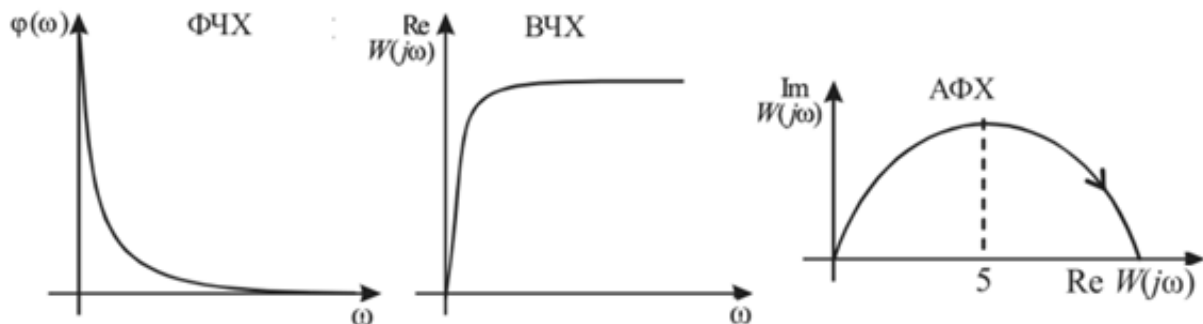


Рисунок 7.3 – Частотні характеристики передавальної функції [13]

Таким чином, з визначенням передавальної функції отримуються характеристики системи.

Один з методів побудови математичних динамічних моделей «вхід-вихід» полягає у визначенні реакції об'єкта на певний стандартний сигнал.

У разі, коли на вхід об'єкта з нульовими початковими умовами надходить одиничний ступінчастий сигнал, на його виході виникає реакція у вигляді перехідної характеристики $h(t)$.

Оскільки ступінчастий сигнал легко отримати на практиці, то перехідну характеристику можна зняти експериментально. Для аналітичного визначення перехідної характеристики $h(t)$ потрібно вирішити диференціальне рівняння при нульових початкових умовах і одиничному вхідному впливі:

$$y^n + a_n y^{n-1} + a_{n-1} y^{n-2} + \dots + a_1 y = b_m u^m + \dots + b_0 u, \quad (7.17)$$

$$y(0) = 0, \quad \dot{y}(0) = 0, \quad y^{n-1}(0) = 0 \quad (7.18)$$

$$1(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t < \tau > 0, \\ 1, & t \geq \tau > 0, \end{cases} \quad (7.19)$$

де τ – момент виникнення вхідного сигналу.

Приклад перехідної характеристики системи показаний на рисунку 7.4.

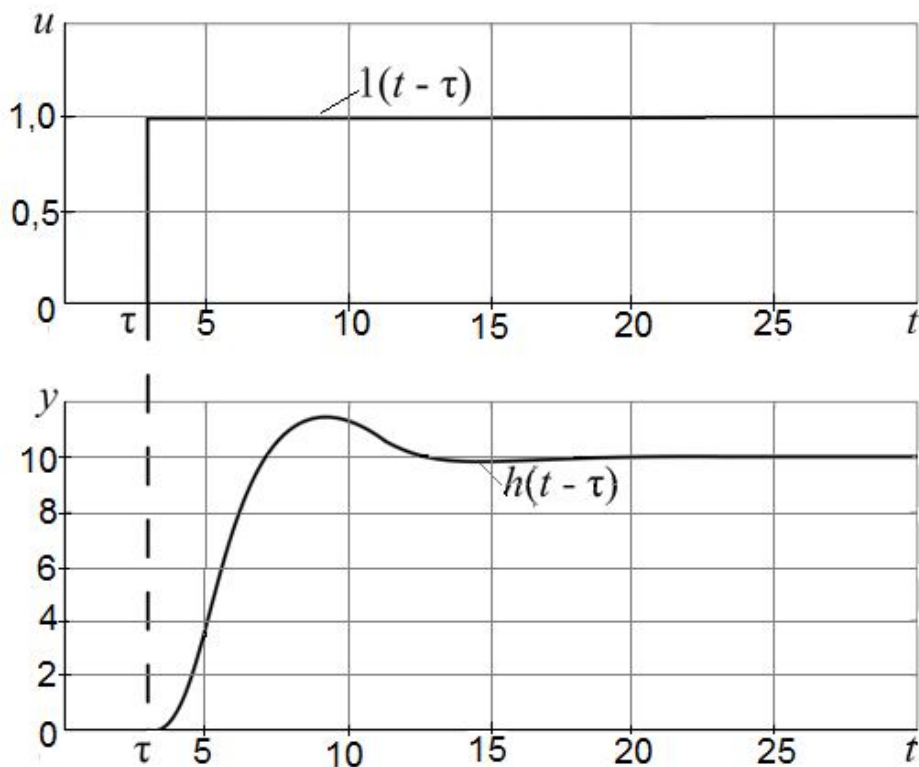


Рисунок 7.4 – Приклад перехідної характеристики [13]

Імпульсна перехідна характеристика $g(t)$ становить реакцію на вхідний вплив типу одиничної імпульсної функції (рис. 7.5).

Так само як і перехідна характеристика системи, вона визначається при нульових початкових умовах, коли система знаходиться в стані спокою.

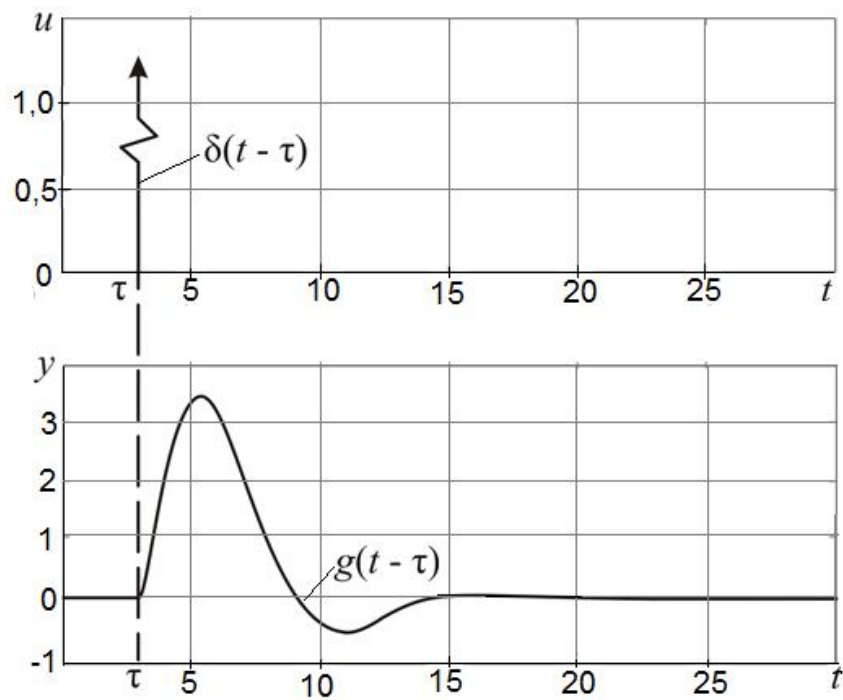


Рисунок 7.5 – Приклад імпульсної перехідної характеристики [13]

Вхідний вплив типу одиничної імпульсної функції математично відображає дельта-функція, яка має властивості:

$$1) \quad \delta(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t \neq \tau, \\ \infty, & t = \tau; \end{cases} \quad 2) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - \tau) d\tau = 1. \quad (7.20)$$

На практиці імпульсні вхідні впливи на об'єкт завжди кінцеві за рівнем і тривалістю. Однак з певною точністю реальний вхідний вплив сигналу типу удару можна замінити дельта-функцією з деяким коефіцієнтом, тому що його тривалість набагато менше тривалості перехідних процесів.

Перехідна характеристика й імпульсна перехідна функція однозначно пов'язані між собою співвідношеннями:

$$g(t) = \dot{h}(t), \quad h(t) = \int_0^t g(\theta) d\theta, \quad (7.21)$$

що дозволяє за однієї відомої характеристики визначити другу.

Показані моделі використовуються переважно для лінійних елементів системи. Застосування лінійних математичних моделей для оцінювання процесів в ЕМС виправдано зазвичай тільки в певному діапазоні зміни стану.

7.3 Динамічні характеристики нелінійних елементів

За інших умов роботи ЕМС виникають фізичні процеси, які можуть стати істотно нелінійними, що вимагає відповідного їх оцінювання.

Оскільки динаміка процесів нелінійної системи, як і її стійкість, залежить від величини зовнішніх впливів і початкових умов, то в цій ситуації методи лінійної теорії незастосовні. Під час аналізу властивостей нелінійної системи завжди обмовляється чисельне значення зовнішніх впливів [13]. Основна особливість нелінійних систем полягає в тому, що на відміну від лінійних систем до них не застосовується принцип суперпозиції. Водночас їхню реакцію на кілька довільних зовнішніх впливів не можна розглядати як суму складових на кожний вплив окремо.

Вид і якість перехідного процесу нелінійної системи істотно залежать від величини вхідного впливу і початкових умов. Якщо в лінійній системі якість процесу не змінюється при зміні вхідного впливу, то в нелінійній системі збільшення вхідного впливу (рис. 7.6) спричиняє якісну зміну перехідного процесу (зі стійкого він стає нестійким).

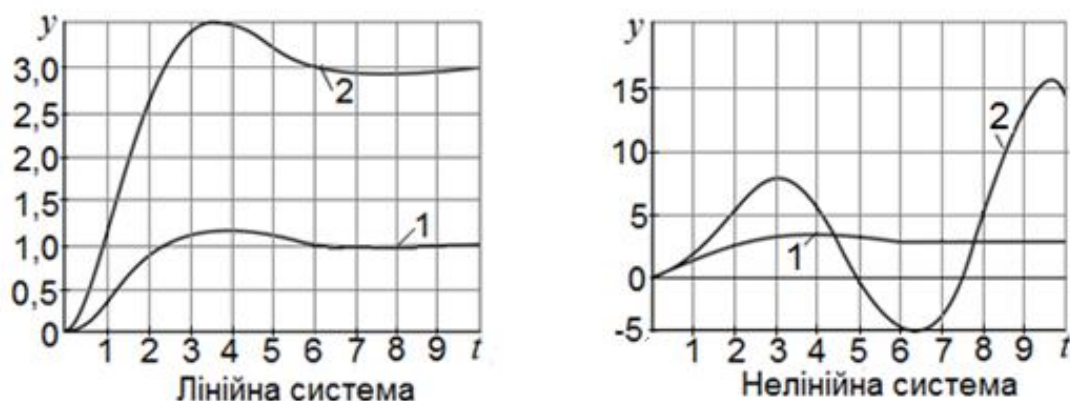


Рисунок 7.6 – Приклад реакції систем (1, 2) на зміну вхідної дії: $u_2 > u_1$ [13]

Зміна початкових умов, яка не тягне за собою зміну якості процесів у лінійному випадку, також може спричиняти істотну відмінність у перехідних процесах, наприклад виникнення коливань (рис. 7.7).

У нелінійній системі може існувати кілька станів рівноваги систем (x_1 , x_2), до яких залежно від величини початкових умов і вхідних впливів прагнуть перехідні процеси. Наприклад, як видно з рисунка 7.8, точка лінійної системи, що зображає різні початкові стани, рухається до єдиної точки рівноваги.

У нелінійній системі з одного початкового стану точка, що його зображає, рухається до стану рівноваги $X = 0$ (траєкторія 1), а з іншого – по

замкнутій траєкторії, яка називається граничним циклом (крива 2).

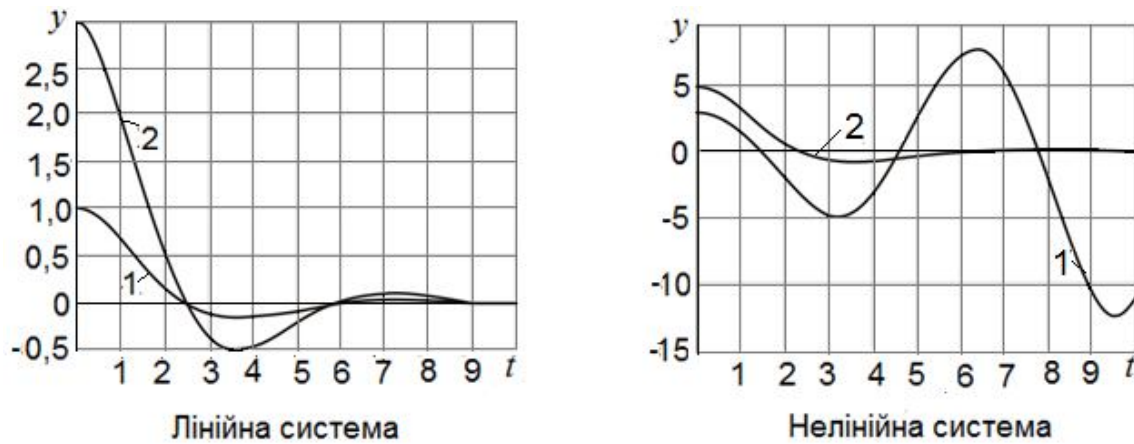


Рисунок 7.7 – Приклад реакції систем (1,2) на зміну початкових умов і виникненні коливань [13]

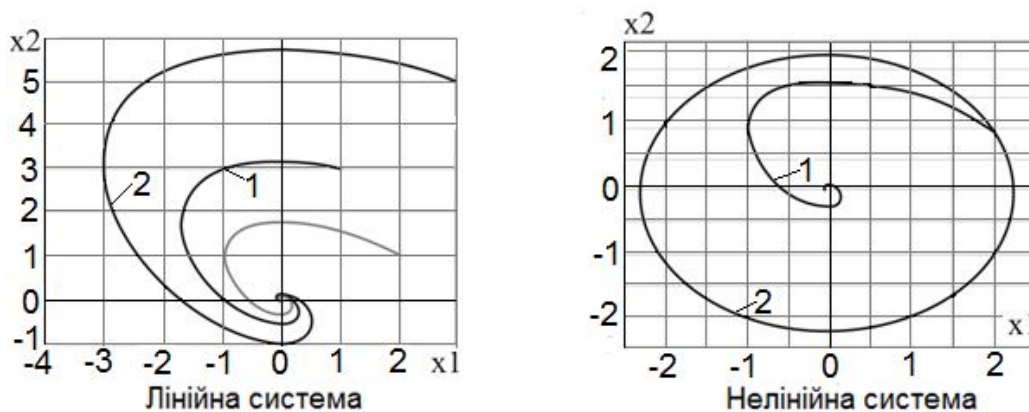


Рисунок 7.8 – Приклад станів рівноваги систем (1, 2) [13]

Для кожної точки справедлива умова $\dot{X} = 0$. Отже, ця фазова траєкторія відповідає рівноважному режиму роботи системи.

Приклад 2. Зобразити фазовий портрет системи (рис. 7.8), де передавальна функція лінійної частини має вигляд

$$W(p) = \frac{4}{0,5p^2 + 0,3p + 1}.$$

У цьому випадку нелінійний елемент системи – є «мертва» зона шириною $c = 0,5$ і коефіцієнтом посилення $k = 1$. Чисельне значення вхідного впливу $v = 1$. Модель системи представлена у відносних змінних.

Для оцінки параметрів лінійної частини системи в змінних стану, попередньо вважається: $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -2x_1 - 0,6x_2 + 8u. \end{cases}$$

Для побудови зображення стану елемента системи (фазового портрета) використовується інструмент візуального моделювання Simulink пакета MATLAB. Відповідна схема моделювання показана на рисунку 7.9.

Подане зображення системи має фазові траєкторії руху з різних початкових станів (рис. 7.10).

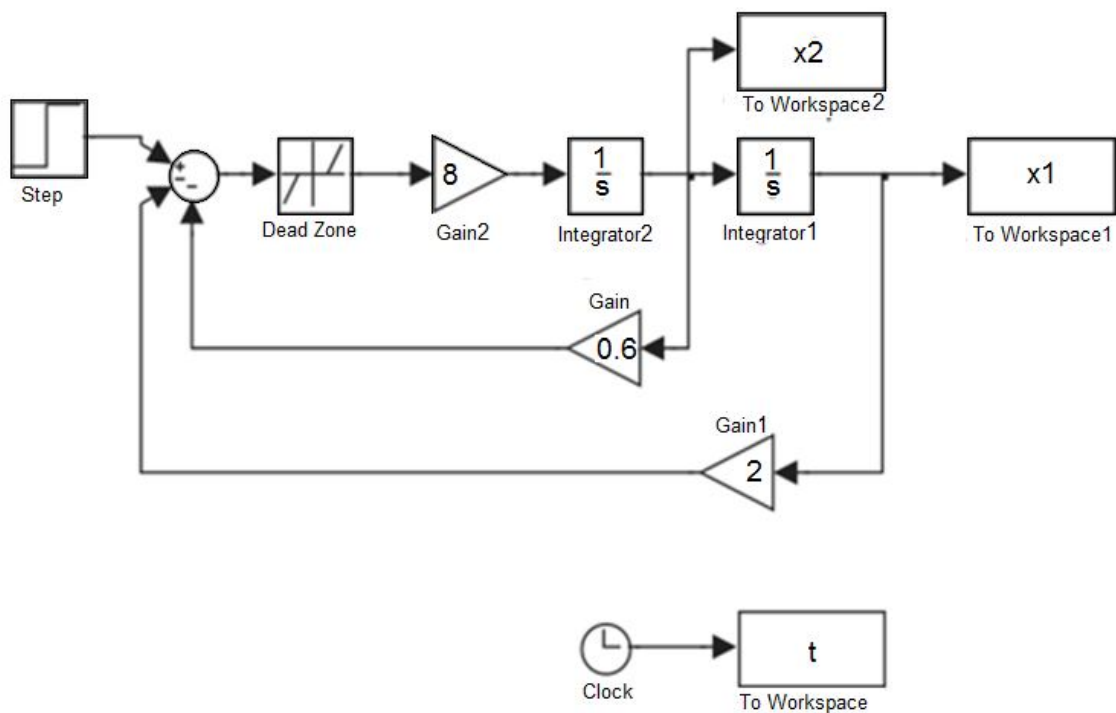


Рисунок 7.9 – Схема моделювання комбінованої системи в Simulink [13]

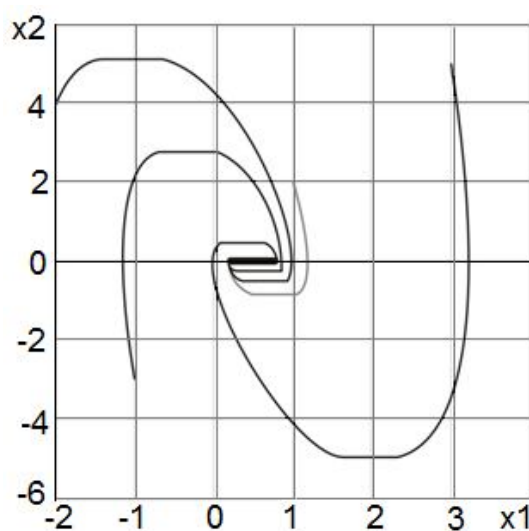


Рисунок 7.10 – Результати моделювання початкового стану системи [13]

Таким чином, сукупність усіх фазових траєкторій, отриманих під час руху з різних початкових станів, становить фазовий портрет, який дозволяє оцінити властивості нелінійної системи.

Точки простору станів, для яких справедлива умова $\dot{X} = 0$, є точками рівноваги системи. Наявність граничного циклу в просторі станів означає, що в нелінійній системі виникають автоколивання, які представляють власні періодичні процеси, з параметрами (наприклад, частота і фаза), що не залежать від початкових умов (рис. 7.11).

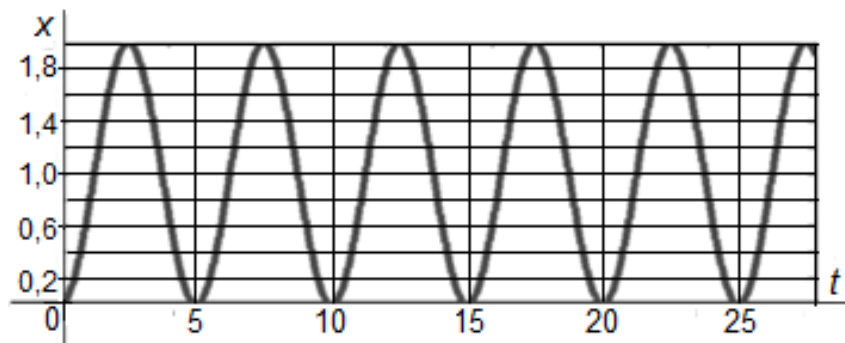


Рисунок 7.11 – Приклад автоколивального режиму

З урахуванням характеристик деяких елементів, які мають істотний нелінійний характер і взагалі не можуть бути лінеаризовані (наприклад, реле з гістерезисом), необхідно застосовувати нелінійні динамічні математичні моделі для оцінки ЕМС.

Серед нелінійних моделей можна виділити статичні нелінійні елементи, аналіз яких представляється у вигляді нелінійних характеристик $y = f(x)$.

Такого роду характеристики мають гідравлічні, пневматичні, електромагнітні підсилювачі.

Статичні характеристики нелінійних ланок можуть містити типові нелінійності: насичення, зону нечутливості, релейне перемикання, люфт, петлю гістерезису тощо. Деякі приклади таких характеристик подано на рисунку 7.12 [13].

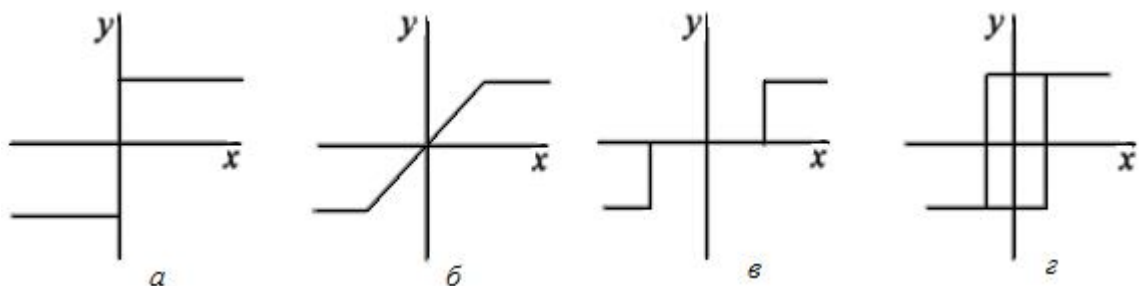


Рисунок 7.12 – Приклади статичних характеристик нелінійних ланок:

ідеальне реле (а); підсилювач з обмеженням (б);
реле з зоною нечутливості (в); реле з гістерезисом (г) [13]

Крім статичних нелінійних елементів, виділяють також динамічні нелінійні ланки, процеси в яких також потрібно оцінювати нелінійними диференціальними рівняннями.

У загальному випадку поведінку нелінійних багатоканальних систем характеризують рівняння стану і виходу:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X, u), & X \in R^n, & u \in R^m, \\ y = g(t, X), & y \in R^m, & n \geq m, \end{cases} \quad (7.22)$$

де $f(t, X, u)$ і $g(t, X)$ – нелінійні вектор-функції.

Залежність цих функцій від часу t відображає дію як параметричних, так і сигнальних збурень, тобто вплив навколишнього середовища і зміну параметрів об'єкта.

В окремому випадку керуючий вплив може входити в рівняння стану (7.22) у вигляді суми з нелійними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X) + B(t, X)u, \\ y = g(t, X), \end{cases} \quad (7.23)$$

де $B(t, X)$ – матриця нелінійних коефіцієнтів розміру $n \times m$.

При відсутності управляючого впливу в (7.23) наявна нелінійна нестационарна автономна модель, яка оцінює процеси руху з ненульових початкових станів:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X), \\ y = g(t, X). \end{cases} \quad (7.24)$$

Якщо права частина рівнянь (7.22) – (7.24) не залежить від часу t , то модель відповідає нелінійній стаціонарній системі.

Динамічні процеси в нелінійній ЕМС з одним входом і одним виходом мають рівняння вигляду:

$$y^n = f(t, y, \dots, y^{n-1}) + b(t, y, \dots, y^{n-1}) \cdot u, \quad (7.25)$$

яке також можна представити у формі (7.22), обравши відповідно лінійно-незалежні змінні стану.

До нелінійних моделей належать, наприклад, сили тертя, рух рухомих елементів (за наявності в з'єднаннях люфтів), течії робочої рідини (за нерівномірної подачі насосів) та інші процеси.

Під час складання загальної математичної моделі динамічних процесів в ЕМС необхідно попередньо отримувати характеристику окремих елементів у вигляді відповідних рівнянь, які по можливості необхідно лінеаризувати. Ланки рівнянь, які допускають лінеаризацію, утворюють лінійну частину системи. Пристрої, поведінку яких можна оцінити тільки за допомогою нелінійних рівнянь, складають її нелінійну частину. У результаті отримується система з *комбінованою оцінкою* (рис. 7.13).

У такій схемі нелінійним елементом (НЕ) – є нелінійна частина системи, яка становить сукупність всіх нелінійних ланок. Часто в комбінованій системі як НЕ розглядається статична нелінійність, де залежність між вхідною і вихідною величинами характеризується співвідношенням $u=f(\Delta)$.

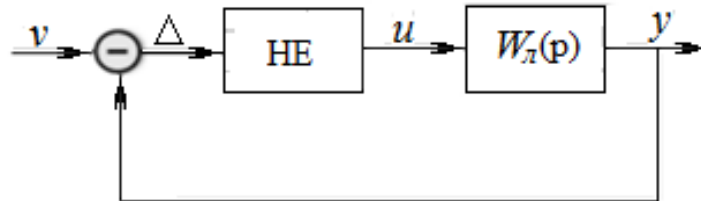


Рисунок 7.13 – Структурна схема комбінованої системи
 v – величина вхідного сигналу; Δ – помилка від впливів [13]

Лінійна частина системи оцінюється передавальною функцією $W_n(p)$.

Динаміка ЕМС зазвичай характеризується нелінійними диференціальними рівняннями. Разом із тим нелінійна функція наближено замінюється лінійною так щоб залежно від обраного показника обидві ці функції збігалися.

Вибір способу лінеаризації нелінійних елементів визначається кінцевою метою дослідження. Проте заміна нелінійної ланки лінеаризованою завжди пов'язана з певною втратою точності рішення. Важливо, щоб такий перехід не призвів до зміни якісних властивостей системи. Ця вимога виконується, якщо лінеаризація нелінійної функції $y = f(x)$ виконується у малому просторі робочої точки x^0 .

Якщо функція $f(x)$ в просторі робочої точки неперервна і диференційована, то її можна розкласти в ряд Тейлора:

$$y = f(x^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 (x - x^0) + R(x), \quad (7.26)$$

де $y^0 = f(x^0)$ і $\frac{\partial f}{\partial x}|_0$ – значення функції і похідною в робочій точці відповідно;

$R(x)$ – члени ряду розкладання Тейлора вище першого ступеня.

Оскільки члени ряду розкладання $R(x)$ багато менше двох перших доданків, то вони відкидаються і замість (7.26) отримується:

$$y = f(x^0) + \frac{\partial f}{\partial x}|_0 (x - x^0), \quad (7.27)$$

Після віднімання з (7.27) $y^0 = f(x^0)$, отримується:

$$y - y^0 = \frac{\partial f}{\partial x}|_0 (x - x^0). \quad (7.28)$$

У даному випадку приватна похідна розглядається в робочій точці, тому являє собою коефіцієнт, що позначається як $k = \frac{\partial f}{\partial x}|_0$. При введенні позначення $\Delta y = y - y^0$ і $\Delta x = x - x^0$ отримується лінійне рівняння ланки:

$$\Delta y = k \Delta x, \quad (7.29)$$

яке називається рівнянням в відхиленнях.

На практиці така лінеаризація відповідає проведенню дотичній в робочій точці і визначенню $k = \tan \alpha$ (рис. 7.14).

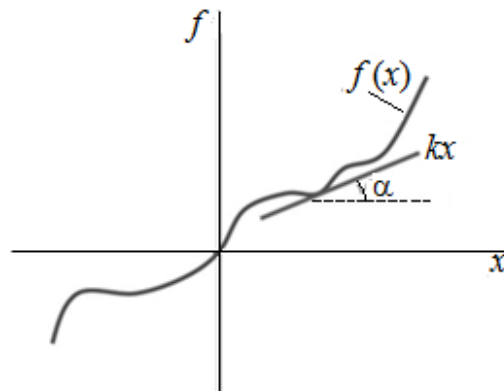


Рисунок 7.14 – Ілюстрація лінеаризації статичної характеристики [13]

Це особливо важливо в тих випадках, коли функція $f(x)$ не має аналітичного виразу.

Отже, при розгляданні нелінійних систем необхідно визначати їхні лінійні елементи, або ланки і використовувати необхідний механізм розрахунку параметрів.

7.4 Автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи

Одним із напрямів наукових досліджень в електромехатроніці є розробка загальних теоретичних положень, на основі яких можливе створення ефективних методів математичного моделювання ЕМС і алгоритмів автоматизації моделювання. Оскільки властивості об'єкта керування, виконавчого приводу й інформаційної системи повинні розглядатися в комплексі та враховуватися вже на ранніх стадіях проєктування ЕМС, необхідно розробляти моделі динаміки як механічних, так і електричних підсистем за допомогою єдиного методу. Разом з тим метод математичного моделювання динаміки ЕМС повинен мати такі властивості [1, 21, 31]:

- інваріантність до фізичної природи об'єктів, що моделюються;
- формальність дій, які виконуються при реалізації методу;
- зручність результатів обчислень для аналізу й використання в проєктуванні.

Роботи-маніпулятори, мобільні роботи, багатокоординатійні верстати з ЧПУ тощо мають просторові виконавчі механізми. Вони мають велику кількість ступенів свободи й містять замкнуті кінематичні контури. Це ускладнює математичне моделювання динаміки таких ЕМС.

Відомі труднощі при моделюванні динаміки становлять багатоступінчасті передавальні механізми приводів. У них істотні відхилення від ідеальної механічної передачі, до яких належать: інерційність, пружна піддатливість ланок, люфти та сухе тертя в кінематичних парах тощо.

Механічна частина машини в окремих випадках може становити неголономну систему (з наявністю диференційних неінтегрованих зв'язків).

Створення математичних моделей динаміки багатовимірних систем, що складаються з фізично різнорідних функціональних частин, становить трудомістке й наукомістке завдання. Для його вирішення в умовах жорстких обмежень часу необхідне ефективне та максимально повне використання можливостей сучасних засобів автоматизації обчислень. До нових можливостей апаратних і програмних засобів автоматизації обчислень належать:

- висока обчислювальна потужність;

- автоматизація створення просторово-геометричних моделей (комп'ютерна графіка);
- автоматизація математичних обчислень у символьному вигляді (комп'ютерна алгебра);
- розвинені системи обміну інформацією між програмними модулями різного цільового призначення;
- вільний доступ учасників проєкту до проміжних результатів проєктування, можливість оперативного використання раніше отриманих результатів у розробці нових проєктів;
- доступність широкому колу користувачів, візуалізація та анімація модельованих об'єктів і процесів.

Відповідно до завдання, автоматизація моделювання динаміки ЕМС полягає:

- в аналізі існуючих методів динаміки й обґрунтуванні вибору методу, на базі якого розробляється математичне забезпечення програмного модуля автоматизованого формування моделі динаміки ЕМС;
- у розробці математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення, орієнтованого на можливості сучасних засобів автоматизації обчислень.

Таким чином, методи, що покладені в основу алгоритмів автоматизованого формування моделей динаміки ЕМС, повинні володіти спільністю, достатньої для обліку всіх перерахованих факторів.

7.5 Порівняльний аналіз методів динаміки

Для отримання рівнянь динаміки багатоланкових виконавчих механізмів розповсюдженими є наукові оцінки з використанням [1, 31–33]:

- методу Лагранжа, що заснований на рівняннях Лагранжа II роду й оцінці кінематики системи матрицями однорідних перетворень координат;
- модифікованого методу Лагранжа, що заснований на рівняннях Лагранжа II роду й рекурентному аналізу кінематики механічної системи;
- методу Ейлера, що заснований на застосуванні другого закону динаміки та принципу Д'Аламбера;
- методу Гауса, який заснований на принципі найменшого примушування;
- методі зв'язкових графів.

Проаналізуємо особливості перелічених методів.

Метод Лагранжа та метод Ейлера вважаються традиційними, які найчастіше використовуються на практиці.

Висновок рівнянь руху голономних механічних систем методом Лагранжа відрізняється простотою та єдністю підходу. Рівняння, що отримані цим методом, забезпечують оцінку динаміки й можуть бути використані для розробки законів керування у просторі приєднаних змінних [1, 31]. Вирази для кінетичної та потенційної енергії ланок можна записати відносно координат ланок у нерухомій системі координат. Перевага методу Лагранжа дає змогу застосовувати його для виведення рівнянь руху механічних систем, що містять замкнуті контури. Як вже було зазначено, рівняння динаміки у формі Лагранжа можна скласти для електричної системи. Наприклад, рівняння та алгоритми динаміки роботів-маніпуляторів, засновані на застосуванні методу Лагранжа [1, 33].

Застосування методу Ейлера веде до системи прямих і зворотних рекурентних рівнянь, послідовно застосованих до ланок механічної системи. Цей метод найефективніший з обчислювального погляду, що дає змогу використовувати його для керування системою в реальному часі і для моделювання її рухів на комп'ютері [1, 31]. Перевагою методу Ейлера є також можливість обчислювати сили та моменти сил реакцій у кінематичних парах механізму. З погляду аналізу, рекурентні співвідношення не є зручними. Тому метод Ейлера практично не застосовується в задачах синтезу законів керування.

Модифікований метод Лагранжа дозволяє отримати рівняння динаміки у векторно-матричній формі, зручній для аналізу. Крім того, ці рівняння забезпечують зниження обчислювальних витрат на розрахунок динамічних коефіцієнтів порівняно з рівняннями Лагранжа. З використанням коефіцієнтів є можливість розрізняти динамічні ефекти, що обумовлені обертальним і поступальним рухом ланок. Це необхідно використовувати під час синтезу керування у просторі станів систем. Обчислювальна ефективність цих рівнянь обумовлена використанням для оцінки кінематики ланок матриць поворотів і векторів відносного положення. Використання модифікованого методу Лагранжа для аналізу систем, що містять замкнуті кінематичні контури, пов'язане з труднощами, тому що цей метод передбачає рекурентні обчислювальні процедури.

Метод, заснований на принципі Гауса, на відміну від методів, заснованих на рівняннях Лагранжа, дає змогу отримувати рівняння динаміки механічних систем, як з голономними, так і з неголономними зв'язками. При використанні принципу Гауса завдання зводиться до визначення прискорень природного руху, які забезпечують мінімум виразу для примушування. Це досягається шляхом чисельної мінімізації примушування як функції узагальнених прискорень механічної системи методом динамічного

програмування або невизначених множників Лагранжа. Перевагою методу Гауса є можливість його застосування для дослідження руху механічних систем із неврегульованими зв'язками. Це досягається саме в тих випадках, коли використовуються чисельні методи мінімізації примушування на кожному кроці інтегрування рівнянь динаміки.

Метод зв'язкових графів ґрунтується на поданні системи (механічної, електричної, гідравлічної або комбінованої) у вигляді деякого кінцевого числа елементів, що мають формальний математичний опис і з'єднаних один з одним у загальну структуру за допомогою зв'язків. Цей метод є результатом розвитку теорії графів, одним з основоположників якої був Л. Ейлер.

Математична модель динаміки системи відображається у вигляді схеми (графа), на підставі якої виводяться рівняння динаміки, водночас механічна частина системи може бути неголономною. Головною перевагою методу зв'язкових графів є структурно-графічне представлення динаміки досліджуваних систем. Це дає змогу простежити всі взаємовпливи елементів системи візуально й отримати рівняння динаміки шляхом застосування до зв'язкового графу простих законів Кірхгофа. Використання методу зв'язкових графів дає найбільший ефект при оцінці, аналізі та проектуванні розгалужених систем із наявністю замкнених кінематичних контурів.

Порівняльний аналіз методів подання в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Порівняльний аналіз методів динаміки

Метод	Механічні системи			Елект- ричні системи	Результат обчислень		
	голо- номні	неголо- номні	із замкне- ними контурами		замкнена система диферен- ційного рівняння	реку- рентне рівняння	числе- ний
Лагранжа	+	–	+	+	+	–	–
модифіко- ваний			–				
Ейлера	+	–	–	–	–	+	–
Гауса	+	+	+	–	–	–	+
зв'язкових графів	+	+	+	+	+	–	–

Результати порівняльного аналізу свідчать про те, що найперспективнішим з погляду автоматизації моделювання динаміки ЕМС є метод зв'язкових графів. Цей метод, з одного боку, має найбільшу спільність і необхідну інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження.

З іншого боку, результатом його застосування є не тільки замкнута система диференційних рівнянь динаміки, а й зв'язковий граф досліджуваної

системи. Це розширює можливості інженерного аналізу й автоматизації моделювання динаміки з використанням інформаційних систем.

Таким чином, метод зв'язкових графів прийнятий як теоретична основа рівнянь і алгоритмів автоматизованого моделювання динаміки ЕМС, який необхідно розглянути докладніше.

7.6 Метод зв'язкових графів

Динамічні властивості технічної системи, що визначають характер процесів, можуть бути подані у вигляді графа, на якому зв'язки між елементами системи відображаються у вигляді ліній або стрілок. Метод отримання рівнянь динаміки системи шляхом застосування закону збереження до вузових точок її графа, називається методом зв'язкових графів. Цей метод успішно застосовувався в задачах математичного моделювання динаміки різних технічних систем [1, 22, 33].

В основу методу зв'язкових графів покладено системний підхід щодо опису динаміки. Досліджуваний об'єкт розглядається у вигляді сукупності пов'язаних між собою у загальну структуру елементів, що функціонують як єдине ціле.

Динамічна система має входи та виходи, через які здійснюється обмін енергією з елементами поширеної системи, до складу якої входить розглянута система. Наприклад, виконавчий привод робота отримує енергію від джерела живлення, перетворює її та поставляє на вхідні ланки механізмів робота. Отже, привод розглядається як підсистема робота. Певна частина енергії живлення перетворюється приводом у теплову енергію і розсіюється. Зі свого боку, робот також є підсистемою, яка взаємодіє з іншими одиницями технологічного обладнання тощо.

Принципово важливо, що досліджувана динамічна система є ізольованою і не розглядається поза зв'язком з елементами системи.

Стан кожного елемента у фіксованій момент часу руху системи характеризується двома параметрами: величиною e (від англ. *effort* – зусилля), що має фізичний сенс «зусилля, напруга» і величиною f (від англ. *flux* – потік), що має фізичний сенс «швидкість».

Розподіл потоків (зусиль) у вузових точках зв'язкового графа підкоряється закону збереження енергії, сформульованому у вигляді першого (другого) закону Кірхгофа:

- для вузла з одним і тим самим значенням швидкості f

$$\sum_k f_k = 0; \quad (7.30)$$

– для вузла з одним і тим же значенням динамічного стану e

$$\sum_k e_k = 0. \quad (7.31)$$

На підставі законів (7.30) і (7.31) формуються диференціальні рівняння динаміки досліджуваної системи. Серед елементів динамічної системи виокремлюють: інерційний накопичувач енергії, ємнісний накопичувач енергії, дисипативний елемент, функціональний перетворювач, гіратор.

На входах і виходах системи розташовані джерела зусиль (потоків), що визначають дію з боку більш ширшої системи, у складі якої міститься досліджувана система. Перейдемо до докладного розгляду кожного з елементів.

Динамічний стан інерційного накопичувача енергії у загальному випадку характеризується рівнянням:

$$e = \frac{d}{dt}(mf), \quad (7.32)$$

де $f = dq/dt$, $q = q_1(t)$ – координата,
 $m = m(t)$ – інерція накопичувача,
 t – час.

Зокрема, якщо, $m = \text{const}$, то рівняння (7.32) приймає вигляд:

$$e = m \frac{df}{dt}. \quad (7.33)$$

Інерційним накопичувачем у механічній системі є масивне тіло:

- якщо q – поступальне переміщення, то m – маса тіла, e – сила;
- якщо q – обертальний рух тіла навколо деякої вісі, то m – момент інерції, e – момент сили відносно цієї вісі;
- якщо в електричній системі функції інерційного накопичувача виконує котушка індуктивності, то q – заряд, що протікає через поперечний переріз провідника, m – індуктивність, e – напруга на клемі котушки.

Ємнісний накопичувач енергії в загальному випадку описується рівнянням:

$$e = \int (kf) dt, \quad (7.34)$$

де $k(q) = de/dq$ – жорсткість накопичувача.

У більшості інженерних задач жорсткість накопичувачів постійна та рівняння (7.34) використовується у вигляді:

$$e = k \int f dt. \quad (7.35)$$

Ємнісним накопичувачем у механічній системі є пружне тіло (пружина): якщо q – лінійна деформація, то k – коефіцієнт жорсткості; якщо q – кутова деформація, то k – крутильна жорсткість.

В електричній системі ємнісним накопичувачем енергії є конденсатор:
 $k = 1/C$,

де q – заряд на обкладинках конденсатора;

C – ємність конденсатора.

Очевидно, що одне й те саме фізичне тіло (електричний провідник) має як властивості інерційного, так і властивості ємнісного накопичувача. Вибраний елемент (тіло або провідник) математично оцінюється у конкретному завданні. Це залежить від того, яка властивість є більш істотною, і буде враховуватися у розрахунках.

Дисипативний елемент, який перетворює механічну або електричну енергію в теплову енергію, описується рівнянням:

$$e = dR \varphi(f), \quad (7.36)$$

де R – коефіцієнт, який в загальному випадку є функцією часу.

Найчастіше у рівнянні (7.36) приймають $R = \text{const}$ і $\varphi(f) = f$ – лінійний опір із постійним коефіцієнтом. У механічних системах за допомогою дисипативного елемента враховують втрати енергії, що обумовлені наявністю сухого та в'язкого тертя. У електричних системах – це втрати енергії на активних опорах (резисторах).

Функціональний перетворювач перетворює енергію, що подається на його вхід з одними параметрами в енергію того самого виду, але з іншими параметрами. Це характеризується рівняннями:

$$e_{\text{вих}} = m_{\text{пр}}^{-1} e_{\text{вх}}, \quad f_{\text{вих}} = m_{\text{пр}} f_{\text{вх}}, \quad (7.37)$$

де $e_{\text{вх}}, e_{\text{вих}}$ – зусилля, $f_{\text{вх}}, f_{\text{вих}}$ – потоки на вході та виході перетворювача;
 $m_{\text{пр}}$ – коефіцієнт перетворювача.

У загальному випадку m_{np} – є функція часу t , яка може бути задана неявно. Під час моделювання динаміки механічних систем рівняння (7.37) використовуються для математичного аналізу ідеальних механізмів, зокрема й з рідкими (газоподібними) робочими тілами. В електричних системах – для оцінки ідеальних перетворювачів електричних сигналів.

Теплові втрати в реальних механізмах і електричних ланцюгах враховуються шляхом додавання в розрахункову модель відповідних дисипативних елементів із наведеними значеннями опору при розв’язанні конкретної задачі.

Гіратор (від грец. *gyros* – коло, обертання) перетворює енергію одного виду в енергію іншого виду. Він характеризується рівняннями:

$$e_{вих} = k_G f_{вх}, \quad f_{вих} = k_G^{-1} e_{вх}, \quad (7.38)$$

де k_G – коефіцієнт гіратора.

Рівняння (7.38) відповідають ідеальному гіратору. Під час моделювання гіраторів з урахуванням теплових втрат у розрахункову модель додаються дисипативні елементи. Прикладом гіратора є електричний двигун:

$$M_D = k_G i_a, \quad \omega_D = k_G^{-1} e_c; \quad k_G = k_D \Phi, \quad (7.39)$$

де M_D – момент двигуна,
 i_a – струм в ланцюзі якоря,
 ω_D – кутова швидкість,
 e_c – противо-ЕРС двигуна;
 Φ – магнітний потік двигуна,
 k_D – конструктивний коефіцієнт.

Розглянуті елементи мають математичний опис, інваріантний до фізичного походження модельованих систем і процесів. Тому метод зв’язкових графів найкраще підходить для використання в задачах математичного моделювання динаміки ЕМС. Наявність зв’язкового графа дозволяє візуально проаналізувати динамічні взаємовпливи у досліджуваній системі, а прості закони (7.30) і (7.31) зручні при автоматизованому отриманні рівнянь динаміки.

7.7 Моделювання та автоматизація динаміки систем із використанням методу зв’язкових графів

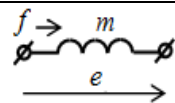
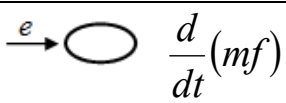
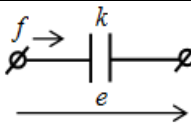
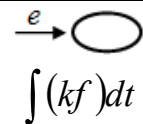
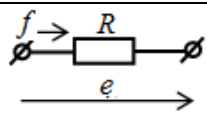
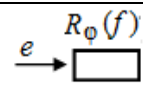
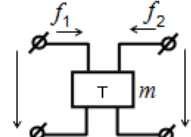
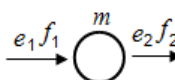
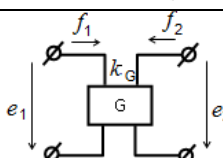
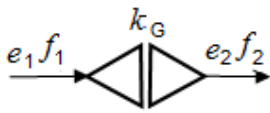
Зв’язковий граф динамічної системи може бути побудований у двох еквівалентних варіантах. Граф, зв’язки якого не утворюють замкнених контурів, називається безконтурним, в іншому випадку – контурним.

Безконтурні граfi менш відомі. Вони застосовувалися окремими дослідниками для моделювання динаміки систем, що складаються з матеріальних точок або з твердих тіл, які роблять прості рухи.

Більш традиційними в задачах моделювання динаміки технічних систем є контурні граfi, які широко поширилися в електротехніці й гідравліці.

У таблиці 7.2 подані позначення елементів для двох зазначених варіантів зв'язкових графів [1, 32].

Таблиця 7.2 – Позначення елементів

Найменування елемента	Позначення	
	Контурний граф	Безконтурний граф
Інерційний накопичувач енергії		
Ємнісний накопичувач енергії		
Дисипативний елемент		
Функціональний перетворювач		
Гіратор		

Отже, на контурному графі інерційний, ємнісний накопичувачі та дисипативний елемент є двополюсниками, на безконтурному графі – одновхідними елементами.

Функціональний перетворювач і гіратор на контурному графі є чотиріполюсниками, а на безконтурному – двовхідними елементами. Розглянемо деякі приклади математичного моделювання з використанням зв'язкових графів.

З погляду автоматизації найскладнішим є формування розрахункової схеми, оскільки перехід від реального технічного об'єкта до його розрахункової схеми пов'язаний з необхідністю визначення сукупності факторів і умов, які будуть враховані під час моделювання.

Твердження, згідно з якими одні діючі фактори визнаються істотними, а інші – незначними, ґрунтуються на інженерному досвіді та творчій інтуїції дослідника.

Ця обставина загалом призводить до неможливості повністю автоматизувати процедуру формування розрахункової схеми технічного об'єкта. Виняток становлять лише конструкції, вузли та елементи, для яких існують готові розрахункові схеми.

Наприклад, підшипникові опори валів редукторів, балкові конструкції, типові чотириполюсники з пасивними електротехнічними елементами, тощо. В інших випадках розрахункова схема, що достатньою мірою відповідає властивостям реального технічного об'єкта, може бути складена лише інженером-фахівцем.

Розглянемо деякі приклади розв'язання задач із використанням методу зв'язкових графів.

Приклад 3. Визначити коефіцієнт корисної дії (ККД) одноступінчастого редуктора з передавальним числом u (рис. 7.15) як функцію моменту корисного навантаження M_H . Кутова швидкість та момент шестерні: $\omega_1 = \text{const}$; $M_1 = \text{const}$.

Зв'язковий граф редуктора зображений на рисунку 7.16.

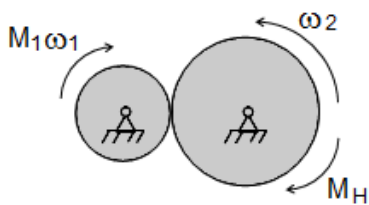


Рисунок 7.15 – Розподіл моментів системи

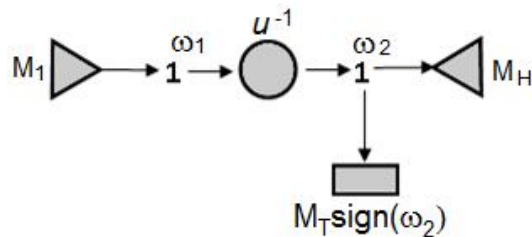


Рисунок 7.16 – Зв'язковий граф редуктора

Момент сил сухого тертя, наведений до вихідного вала:

$$M_T = M_0 + fM_H, \quad (7.40)$$

де M_0 – момент тертя в ненавантаженій передачі,
 f – постійний коефіцієнт тертя, $|f| < 1$.

Ланки редуктора вважати абсолютно твердими.

Розв'язання. При застосуванні до вузлів графа закону, отримується рівняння моментів:

$$M_1 = u^{-1}(M_H + M_T \text{sign}(\omega_2)).$$

Помноживши ліву та праву частини рівності на ω_1 і враховуючи, що $\omega_1 = u\omega_2$, отримується рівняння балансу потужності:

$$M_1\omega_1 = M_H\omega_2 + M_T\omega_2\text{sign}(\omega_2). \quad (7.41)$$

Розділивши (7.41) на вхідну потужність $M_1\omega_1$, отримується $1 = \eta + \chi$, де η – ККД редуктора

$$\eta = M_H / M_1 u; \quad (7.42)$$

χ – коефіцієнт втрат на тертя:

$$\chi = M_T \text{sign}(\omega_2) / M_1 u. \quad (7.43)$$

Шукане рівняння:

$$\eta(M_H) = 1 - M_T \text{sign}(\omega_2) / (M_H + M_T \text{sign}(\omega_2)), \quad (7.44)$$

та графік $\eta(M_H)$ наведено на рисунку 7.17.

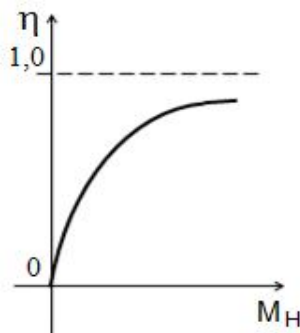


Рисунок 7.17 – Залежність $\eta(M_H)$ [1,32]

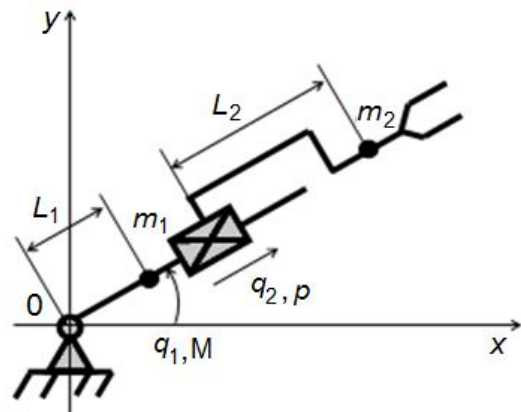


Рисунок 7.18 – Розподіл параметрів системи [1,32]

Аналіз графіка показує, що ККД редуктора дорівнює нулю, якщо редуктор не навантажений ($M_H = 0$) і зростає за збільшення моменту навантаження, наближаючись до значення, максимально можливого при заданому коефіцієнті тертя. На практиці найбільше значення ККД досягається за оптимального для редуктора значення механічної потужності на вихідному валу (рис. 7.18) і відповідних параметрах.

Приклад 4. Отримати рівняння динаміки електромеханічного приводу (рис. 7.19).

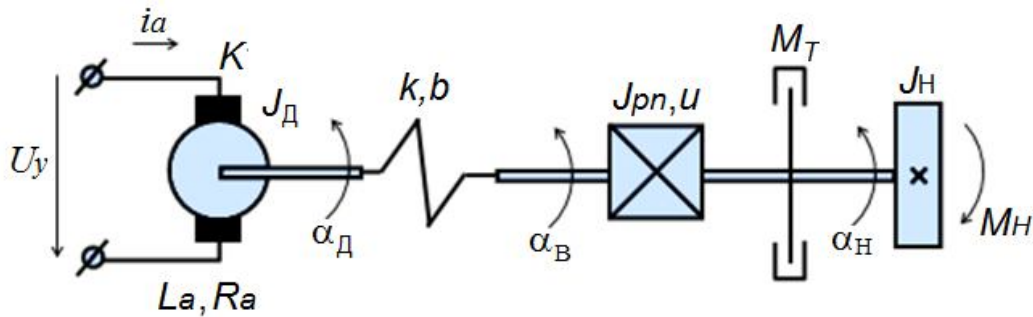


Рисунок 7.19 – Функціональна схема електромеханічного приводу:

U_y – напруга керованого джерела живлення, i_a – струм у ланцюзі якоря двигуна, L_a, R_a – індуктивність і активний опір ланцюга якоря двигуна, K – коефіцієнт двигуна, J_D – момент інерції ротора двигуна, α_D – кут повороту ротора двигуна, k – приведений коефіцієнт жорсткості механічної передачі, b – приведений коефіцієнт втрат на деформацію, α_B – кут повороту вхідного вала редуктора, J_{pH} – момент інерції редуктора, приведений до вала навантаження, u – передавальне відношення редуктора, M_T – момент сухого тертя, приведений до вала навантаження, α_H – кут повороту валу навантаження, J_H – момент інерції навантаження, M_H – момент навантаження [1, 32]

Розв'язання. Безконтурний граф приводу зображений на рисунку 7.20, де $\Delta\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B$.

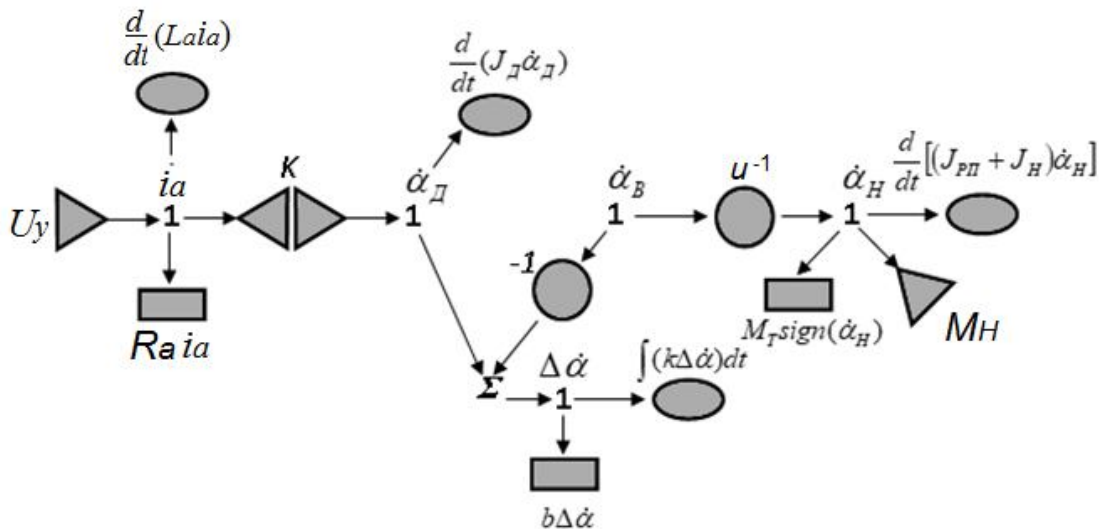


Рисунок 7.20 – Безконтурний граф приводу [1, 32]

Рівняння динаміки:

$$\begin{aligned} k(\alpha_D - \alpha_B) + b(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B) &= u^{-1}[(J_H + J_{pH})\ddot{\alpha}_H + M_T \text{sign}(\dot{\alpha}_H) + M_H], \\ i_a K &= J_D \ddot{\alpha}_D + b(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_B) + k(\alpha_D - \alpha_B), \end{aligned} \quad (7.45)$$

$$U_y = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K \dot{\alpha}_D.$$

Рівняння (7.45) також можуть бути отримані з контурного графа електричної схеми розглянутого приводу (рис. 7.21), відомим з електротехніки, а саме методом контурних струмів.

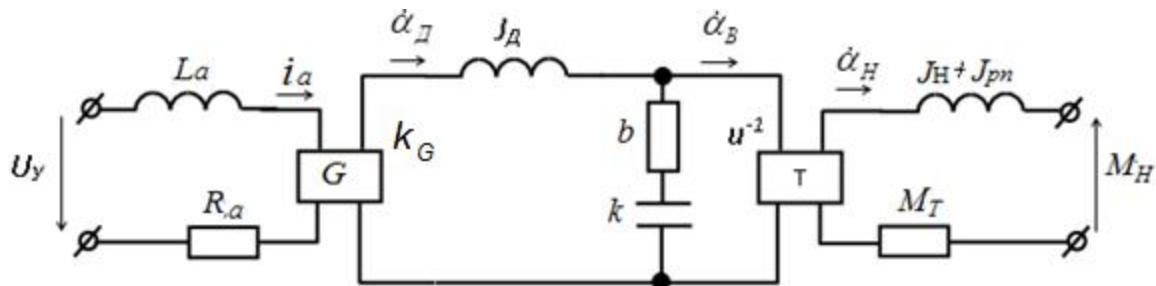


Рисунок 7.21 – Електрична схема приводного механізму [1]

Розглянуті приклади ілюструють можливості методу зв'язкових графів у задачах математичної оцінки динаміки різних, зокрема й фізично неоднорідних, технічних систем.

Автоматизована побудова математичної моделі ЕМС у формі рівнянь динаміки може здійснюватися в такому порядку:

- 1) на основі заданої розрахункової схеми будується зв'язковий граф системи;
- 2) на основі графа виводяться рівняння динаміки.

Виконання етапу 1) в автоматичному режимі легко здійснити, якщо заздалегідь відомо число функціональних перетворювачів у системі та їхні коефіцієнти. У цих випадках зв'язковий граф автоматично відтворюється за заданою розрахунковою схемою, оскільки кожному елементу схеми ставиться у відповідність попередньо занесена в базу даних ділянка зв'язкового графа.

На етапі 2) інформація про структуру графа записується в матрицю $A = [a_{ij}]$, де i – номери вузлів; j – номери зв'язків графа.

Разом із тим якщо зв'язок j входить у вузол i , то $a_{ij} = 1$; якщо зв'язок j виходить з вузла i то $a_{ij} = -1$; якщо зв'язок j не з'єднує вузол i , то $a_{ij} = 0$.

Матриця A , складена у такий спосіб, називається матрицею інцидентів. Тоді рівняння динаміки системи будуть визначатися рівністю, що виражає у векторно-матричній формі закон:

$$A \cdot e = 0, \quad (7.46)$$

де $e = e[e_j]$ – вектор зусиль, що передаються по зв'язках графа.

Якщо зв'язок j здійснюється функціональним перетворювачем із коефіцієнтом m , то за $a_{ij} = -1$ (зв'язок j виходить із вузла i) замість зусилля на виході перетворювача e_j підставляється зусилля на його вході me_j .

Якщо зв'язок j , що з'єднує вузли i і k , здійснюється *гіратором* із коефіцієнтом k_G , то $a_{ij} = -1$, і $e_j = k_G f_k$, $a_{kj} = 1$ $e_j = k_G f_i$.

Пронумеруємо всі вузли та зв'язки в графі приводу (рис. 7.22).

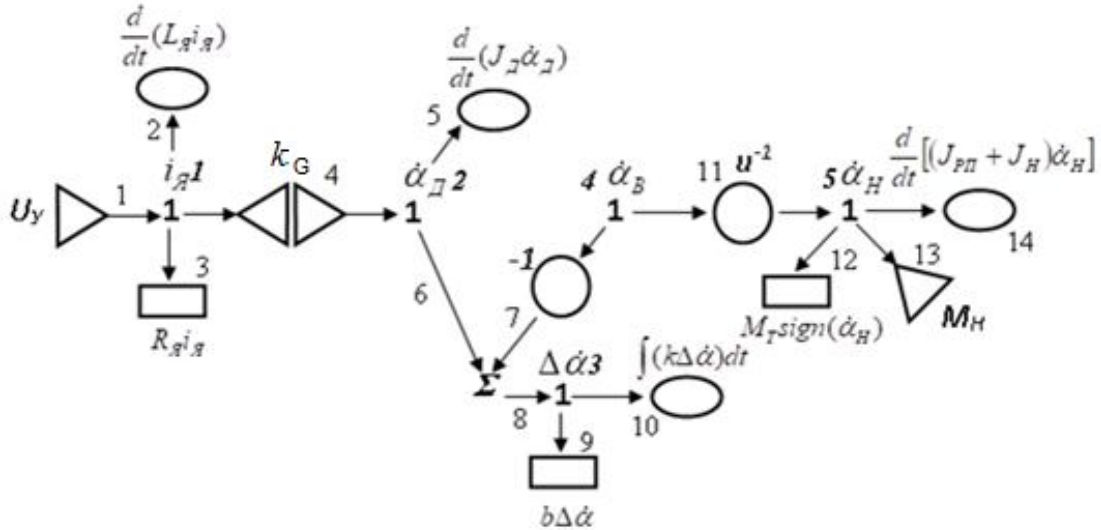


Рисунок 7.22 – Граф приводу та його зв'язки

Номера вузлів виділені жирним шрифтом і курсивом. Матриця значень у цьому разі буде мати вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7.47)$$

Вектор зусиль $e = e[e_j]$, $j = 1, 2, 4$. Тоді згідно з (7.46) і з урахуванням дії гіратора по зв'язку 4, а також функціональних перетворювачів зі зв'язків 7, 11 отримується:

$$A \cdot e = \begin{bmatrix} e_1 - e_2 - e_3 - K \dot{\alpha}_{\pi} \\ K i_{\pi} - e_5 - e_6 \\ e_8 - e_9 - e_{10} \\ -e_7(-1) - e_{11} u^{-1} \\ e_{11} - e_{12} - e_{13} - e_{14} \end{bmatrix} = 0. \quad (7.48)$$

Підставивши в (7.48) значення, відповідні зусиллям у зв'язках графа (див. рис. 7.22), і взявши до уваги вузол Σ із загальним зусиллям $e_6 = e_7 = e_8$, отримуються рівняння, що ідентичні (7.45).

Автоматизоване моделювання та дослідження динаміки мехатронних систем, що задається користувачем на модельному полі зв'язного графу системи, практично реалізується в спеціалізованому пакеті програм CAMP-G.

Викладене дає підставу стверджувати, що метод зв'язкових графів можна розглядати як найзагальніший метод побудови теоретичних моделей динаміки ЕМС.

Контрольні запитання

1. Назвіть базові положення теорії моделювання.
2. Які головні елементи динаміки електромехатронних пристроїв?
3. Проаналізуйте динамічні характеристики нелінійних елементів.
4. Що є автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи?
5. У чому полягає порівняльний аналіз методів динаміки?
6. Охарактеризуйте метод зв'язкових графів.
7. Моделювання та автоматизація динаміки систем із використанням методу зв'язкових графів.
8. Що називається моделлю?
9. Види моделювання.
10. Що називається математичною моделлю?
11. Перелічити форми математичних моделей динаміки.
12. Якими рівняннями описується динаміка мехатронних систем?
13. Що становить метод математичного моделювання?
14. Що належить до апаратних і програмних засобів автоматизації обчислень?
15. Скільки існує методів отримання рівнянь динаміки багатоланкових механізмів. Перелічити.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучасні електромехатронні комплекси та системи : навч. посібник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 102 с.
2. Ловейкін В. С. Мехатроніка : навч. посібник / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Ю. В. Човнюк. – Київ : Компринт, 2012. – 358 с.
3. Bishop R. H. The Mechatronics Handbook / Robert H. Bishop. – Boca Raton : CRC Press, 2002. – 1229 p.
4. Введение в мехатронику : учеб пособие / А. И. Грабченко, В. Б. Клепиков, В. Л. Доброскок и др. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.
5. Подураев Ю. В. Мехатроника. Основы, методы, применение : учеб. пособие для высш. учеб. заведений по спец. «Мехатроника» направления подготовки «Мехатроника и робототехника» / Ю. В. Подураев. – 2-е изд., стереотип. – М. : Машиностроение, 2007. – 256 с.
6. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електропривод / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – Київ : Либідь, 2005. – 678 с.
7. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів : навч. посібник / М. А. Яцун, А. М. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
8. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління : підручник / О. А. Лудченко. – Київ : Знання-Прес, 2004. – 478 с.
9. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посібник / Є. Ю. Форнальчик, М. С. Оліскевич, О. Л. Мاستикаш, Р. А. Пельо. – Львів : Афіша, 2004. – 492 с.
10. Антощенко Р. В. Динаміка та енергетика руху багатоеlementних машинно-тракторних агрегатів / Р. В. Антощенко. – Харків : ХНТУСГ, «Міськдрук», 2017. – 244 с.
11. Мехатроніка транспортних засобів та систем / В. О. Алексієв, В. П. Волков, В. І. Калмиков. – Харків : ХНАДУ, 2004. – 176 с.
12. Дудюк Д. Л. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси : навч. посібник / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, М. М. Мисик. – Львів : «Магнолія плюс» СПД ФО В. М. Піча, 2005. – 278 с.
13. Желудь В. А. Динамика мехатронных систем. : учеб. пособие / В. А. Желудь, Г. А. Французова. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2014 – 176 с.

14. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка : навч. посібник / Л. І. Цвіркун, Г. Грулер ; Нац. гірничий ун-т. – 2-е вид., випр. – Дніпропетровськ : НГУ, 2010. – 224 с.
15. Герман Г. С. Конструкция и принцип действия магнитокоммутационной машины / Силовая электроника. – 2006. – № 1 – С. 82–86.
16. Sumit Ghosh, Tony S. Lee. Intelligent Transportation Systems: Smart and Green Infrastructure Design. Second Edition (Mechanical and Aerospace Engineering Series), CRC Press, 2010. – 217 p.
17. Jesse Russell. Intelligent transportation system.VSD, 2012. – 110 p.
18. Транспортна політика України та її наближення до норм Європейського Союзу / [Сирийчик Т., Фургальські А., Клімкевич Ч., та ін.]; за ред. Марчіна Свенчіцкі. – Київ : Аналітично-дорадчий центр Блакитної стрічки, 2010. – 102 с.
19. Більченко А. В. Будівництво транспортних тунелів і метрополітенів : підручник / А. В. Більченко ; Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. – Харків, 2012. – 183 с.
20. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 370 с.
21. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
22. Яглінський В. П. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва / В. П. Яглінський, Д. В. Іоргачев. – Одеса : АстроПрінт, 2004. – 234 с.
23. Смиронов А. Б. Мехатронные системы микроперемещений. Мехатроника, Автоматизация. Управление / А. Б. Смиронов; № 6, – 2004. – С. 101–107.
24. Силовой расчет, уравнивание, проектирование механизмов и механика манипуляторов : учебное пособие для студентов смешанной формы обучения / [И. Н. Чернышева, А. К. Мусатов, Н. А. Глухов и др.]; Под ред. А. К. Мусатова. – М. : Изд-во МГТУ, 1990. – 80 с.
25. Механика промышленных роботов : учебное пособие для втузов : В 3-х кн. / под ред. К. В.Фролова, Е. И. Воробьева. – М. : Высш. шк., 1988. – 304 с.
26. Кузьмин Д. В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы / Д. В. Кузьмин. – Архангельск : Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. – 120 с.

27. Голубева А. М. Анализ проблемы диагностики асинхронных двигателей с поврежденным короткозамкнутым ротором // Мехатроника : сб. ст. техн. тематики. – 2007. – С. 127–135.
28. Немцов М. В. Электротехника и электроника : учеб. пособие / М. В. Немцов. – М. : Высшая школа, 2007. – 487 с.
29. Поляков А. Е. Управляемые электротехнические комплексы технологического оборудования. Науч.-практ. и метод. реком. по выпол. курс. и диплом. проект : учеб. пособие / А. Е. Поляков, Е. М. Филимонова. – Москва : Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 300 с.
30. Электронні ресурси: www.metran.ru/; www.teplovent.ru/; www.promtex.ru/; www.himdetail.ru/; www.Elticon.ru
31. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике / В. С. Зарубин; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 469 с.
32. Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева. Под ред. Г. П. Гаврилова. Изд. 2-е. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
33. Тевяшев А. Д. Канонічний вигляд квадратичної форми. Метод Лагранжа зведення квадратичної форми до канонічного вигляду / А. Д. Тевяшев, О. Г. Литвин // Вища математика : збірник задач. – Харків : СМІТ, 2010. Ч. 1 у 3-х частинах : Лінійна алгебра та аналітична геометрія. – С. 164–166.
34. Пономарев В. А., Суворов И. Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68).
35. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2002. – 382 с.
36. <http://kond-mariya.narod.ru/nauka.html> Нейронные сети и их устройство [Электронный ресурс].
37. <http://www.neuropower.de/rus/books/index.html> Нейронные сети Хопфилда и Хемминга [Электронный ресурс].
38. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия.– Телеком, 2002. – 382 с.
39. <http://paukoff.fromru.com/neuro/wneuro/index.html> Прогнозирование с помощью искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс].
40. Bayir, R. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors / R. Bayir, O. F. Bay: IJSIT Lecture Note of International Conferense on Intelligent Knowledge Systems, Vol. 1, – № 1, 2004].

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Автоматизація 21

Автоматика 21

Б

Безвідмовність 53

В

Виконавчий механізм 14

Г

Гексапод 87

Гіратор 101

Д

Двигун 14

Деселерограф 39

Деселерометр 39

Діагностична система 24

Діагностична установка 24

Діагностичне обладнання 24

Діагностичне устаткування 24

Діагностичний комплекс 24

Діагностичний пристрій 23

Діагностичний стенд 24

Довговічність 53

Доремонтний ресурс 57

Е

Експертна система 33

Електричний діагностичний прилад 23

Електричні вимірювання 23

Електричні вимірювання неелектричних величин 23

З

Залишковий ресурс 57

Збережуваність 53

І

Інтелектуальна мехатронна машина 16

Інформаційна діагностична система 35

К

Коефіцієнт готовності 65

Контролепридатність 65

М

Метод зв'язкових графів 97

Механізація 20

Мехатроніка 8

Мехатронний модуль 14

Мехатронний модуль руху 15

Мехатронні пристрої 28

Міжремонтний ресурс 57

Мікроконтролер 84

Мікропроцесор 83

Модель 92

Модуль 14

Модуль руху 15

Н

Надійність 52

Надмірність 70

Неелектричний діагностичний прилад 23

Неелектричні вимірювання 23

О

Об'єкт теорії надійності 52

П

Подія 58

Показник надійності 53

Предмет теорії надійності 52

Р

Редуктор 14

Резервування 70

Ремонтопридатність 53

Ресурс 53

Робочий орган мехатронної машини 18

С

Синергетика 8

Система адаптації 36

Система резервування 35

Система самодіагностики 35

Т

Термін експлуатації 53

Тест 70

Ф

Формула Байєса 59

Ю

Юстування 66

ПОЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ

Розділ 2

v	– величина вхідного сигналу (впливу)
T	– постійна часу
d	– коефіцієнт демпфування
μ	– коливальність системи
$\sigma, \%$	– кількісна оцінка, що характеризує процес перерегулювання системи під час коливань (перехідний процес).
$k=k_1k_2$	– коефіцієнт підсилення
$W(p)$	– передавальна функція динамічної системи
p	– оператор диференціювання
ω	– оберտальна частота діапазону, що характеризує фазовий зсув вихідного сигналу по відношенню до вхідного;
$R(\omega)$	– речова частотна характеристика (РЧХ)
η	– вплив вхідного сигналу в операторній формі
t_n	– час перехідного процесу
$h(0)$	– початкове значення перехідної характеристики
g	– прискорення вільного падіння
m_0	– маса гака
m	– маса вантажу, що піднімається
m_{nom}	– маса вантажу (номінальна)
d_b	– діаметр барабана з намотаним на нього канатом
j	– загальне передавальне число механізму приводу лебідки
η'_{meh}	– зворотний ККД при спуску вантажу
η_{meh}	– коефіцієнт корисної дії механічних передач лебідки
v_0	– швидкість підйому й опускання гака без вантажу
v_2	– швидкість опускання гака з вантажем
ω_{nom}	– номінальна кутова швидкість за сталого режиму
ω_2	– кутова швидкість двигуна
M_0	– момент електродвигуна за вільного гака
M_1	– статичний момент опору на валу електродвигуна
M_2	– момент на валу двигуна під час спуску вантажу
M_b	– момент барабану, створений вантажем
M_{ekv}	– еквівалентний момент циклу
M_{calc}	– розрахунковий момент
M_{em}, M_N	– електромагнітний і номінальний момент на валу МКМ
P	– потужність електродвигуна
λ	– перевантажувальна здатність двигуна
t_1, t_2	– час роботи двигуна на підйомі та спуску вантажу
H_1, H_2	– висота підйому та спуску вантажу
u	– сигнал управління на вході схеми МКМ
J	– момент інерції системи
$L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\alpha\beta}$	– індуктивності та взаємно індуктивності в обмотках МКМ

Розділ 4

S	– сукупність елементів M і відносин R
E_f, A_f	– параметри, що характеризують функції системи
E_n, A_n	– параметри, які не належать до функцій приладу
Z	– системний оператор
M	– елементи системи
R	– відносини між елементами системи
M_i^θ	– матриця повороту навколо осі x_i на кут $-q_i$
M_i^α	– матриця переносу вздовж осі x_i на $-a_i$
M_i^S	– матриця переносу вздовж осі $z_i - 1$ на $-s_i$
M_i^φ	– матриця повороту навколо осі $z_i - 1$ на кут $-\varphi_i$
M_i	– матриця переходу з i -ї системи координат у $(i - 1)$
T_i	– матриця перетворення координат i -ої системи в координати базової системи
T_n	– матриця положення вихідної ланки маніпулятора
r_{M0}	– радіус переходу з системи координат будь-якої i -ї ланки
$\overline{k_0}$	– орт вектора нерухомої або базової частини
q_1, q_2, q_n	– узагальнені координати маніпулятора
$\overline{\omega_n}$	– кутова швидкість маніпулятора
α_{nM}	– прискорення захвата маніпулятора
V_{nM}	– швидкість елементів маніпулятора
m	– число обертальних кінематичних пар маніпулятора в механізмі
$\overline{F_n}$	– корисне навантаження
$\overline{M}_{n,n-1}$	– проєкція вектора моменту в кінематичній парі на вісь z
A_Σ	– робота загальних сил залежно від зміни кінетичної енергії
ΔT	– зміна кінетичної енергії системи
$\Delta\Pi$	– зміна потенційної енергії системи
T_n і Π_n	– початок змін кінетичної і потенційної енергій
I_Σ^{np}	– наведений сумарний момент інерції
M_{c0}	– момент опору без деформації
\tilde{M}_c	– момент опору під час пружної деформації
ν	– частота коливань з урахуванням сбурювальних сил
$W_1(p),$ $W_2(p)$	– передавальні функції
ν	– величина вхідного сигналу
Δ^0	– статична помилка
Δ	– помилки під час регулювання
$M(t)$	– зовнішнє обурення
η	– вплив вхідного сигналу
$W_{\partial\delta}(p)$	– передавальна функція двигуна

ω	– кутова частота обертання двигуна
$W_p(p)$	– передавальна функція редуктора
θ_1, θ_2	– значення вихідної величини двигуна та модуля

Розділ 5

s_{ger}^{1+}	– значення ковзання, розраховане за збільшеними частотами гармонік від ГЕР першого порядку
s_{ger}^{1-}	– значення ковзання, розраховане за найменшою частотою ГЕР першого порядку
T_z	– час запису сигналу
F_∂	– частота дискретизації
i_c	– кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу під час визначення частоти мережі;
i_{ger}^{1+}	– кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу під час визначення більшої з частот ГЕР першого порядку
i_{ger}^{1-}	– кількість ітерацій, вироблених алгоритмом за методом автокорекції часу запису сигналу під час визначення меншої з частот ГЕР першого порядку
$i_{ger \max}$	– максимальна кількість ітерацій
$f_{ger}^{1\pm}$	– плюсова і мінусова частоти ГЕР першого порядку відповідно
f_c	– частота мережі
ν	– номер гармоніки
E	– модуль пружності
ρ	– щільність ізоляції статора АД
c	– швидкість поширення акустичної хвилі в ізоляції статора АД
α	– коефіцієнт поглинання акустичних коливань в ізоляції
λ	– довжина хвилі акустичних коливань
K_g	– коефіцієнт готовності
T	– напрацювання на відмову
T_{vp}	– середній час відновлення працездатності

Розділ 6

K_{tr}	– коефіцієнт технічного ресурсу для параметрів, що збільшуються під час експлуатації обладнання
P_g	– граничне значення параметра;
P_v	– вимірне значення параметра;
P_n	– номінальне значення параметра
K_{sr}	– коефіцієнт залишкового ресурсу
$P(A)$	– імовірність події A
m, n	– порядок похідних від вихідної величини
$P(t)$	– імовірність безвідмовної роботи двигуна
$Q(t)$	– імовірність відмови двигуна

$a(t)$	– частота відмов або щільність їхньої імовірності
T_{cp}	– середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови
n	– номер елемента системи
λ_n	– інтенсивність відмов кількості елементів у системі
T_{oi}	– оцінка середнього напрацювання на відмову
T_{pi}	– сумарний час перебування системи в працездатному стані
k	– сумарне число відмов системи
N	– сумарна кількість переривань працездатного функціонування системи за період випробувань
t_{H1}	– момент часу фактичного початку роботи системи після переривання;
t_{K1}	– момент часу фактичного закінчення роботи після настання переривання
T_{bi}	– оцінка середнього часу відновлення
t_{Bj}	– час відновлення системи після j -ї відмови
$T_{reak.i}$	– оцінка середнього часу реакції вхідної інформації
m	– кількість замірів часу обробки запитів i -го типу
t_{is}	– час обробки запиту на видачу вихідної інформації
K_{ri}	– оцінка коефіцієнта готовності системи інформації
$P_{над.i}$	– оцінки ймовірності надійного подання вихідної інформації
T_{oi}^H, T_{oi}^B	– нижня і верхня довірчі межі для показника напрацювання на відмову
T_{bi}^H, T_{bi}^B	– нижня і верхня довірчі межі для показника часу відновлення працездатності системи
K_{ri}^H, K_{ri}^B	– нижня і верхня довірчі межі для показника коефіцієнта готовності системи інформації
$P_{над}^H, P_{над}^B$	– нижня і верхня довірчі межі ймовірності надійного подання запитуваної вихідної інформації

Розділ 7

y	– вихідна змінна
u	– вхідний вплив
n, m	– порядок об'єкта
$X \in R^n$	– вектор стану
$u \in R^m$	– вектор керуючих впливів
A	– квадратна матриця коефіцієнтів
B і C	– прямокутні матриці коефіцієнтів
$W(p)$	– передавальна функція
$W(s)$	– передавальна функція з комплексною змінною
$W_{ij}(p)$	– скалярна передавальна функція
k	– коефіцієнт посилення системи
s	– комплексна змінна
$R(\omega)$	– речова частотна характеристика (РЧХ)

$I(\omega)$	– уявна частотна характеристика (МЧХ)
$\varphi(\omega)$	– фазочастотна характеристика (ФЧХ)
$A(\omega)$	– амплітудночастотна характеристика (АЧХ)
$L(\omega)$	– логарифмічна амплітудночастотна характеристика (ЛАЧХ)
$f(t, X, u);$ $g(t, X)$	– нелінійні вектор-функції
$B(t, X)$	– матриця нелінійних коефіцієнтів розміру $n \times m$
$u = f(\Delta)$	– залежність між вхідними і вихідними величинами
$y = f(x)$	– нелінійна функція
x^0	– мала площа робочої поверхні
y^0	– значення функції з урахуванням похідної в робочій точці
$R(x)$	– члени ряду розкладання Тейлора, які вище першого ступеня
f, q	– координати
$m = m(t)$	– інерція накопичувача
t	– час
$k(q)$	– жорсткість накопичувача
k_G	– коефіцієнт гіратора
M_d	– момент двигуна
i_a	– струм у ланцюзі якоря
ω_d	– кутова швидкість
e_C	– противо-ЕРС двигуна
Φ	– магнітний потік двигуна
k_d	– конструктивний коефіцієнт

Навчальне видання

ПАВЛЕНКО Тетяна Павлівна,
ШАВКУН Вячеслав Михайлович,
КОЗЛОВА Ольга Сергіївна

**СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННІ
КОМПЛЕКСИ І СИСТЕМИ**

ПІДРУЧНИК

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *Т. П. Павленко, О. С. Козлова*

Дизайн обкладинки *Т. П. Павленко,
Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 07.07.2020. Формат 60 × 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 15,4.
Тираж 60 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства ім. О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.